



# I C M I INGENIERIA - CONSTRUCCION - MONTAJE INDUSTRIAL

## EMPRESA

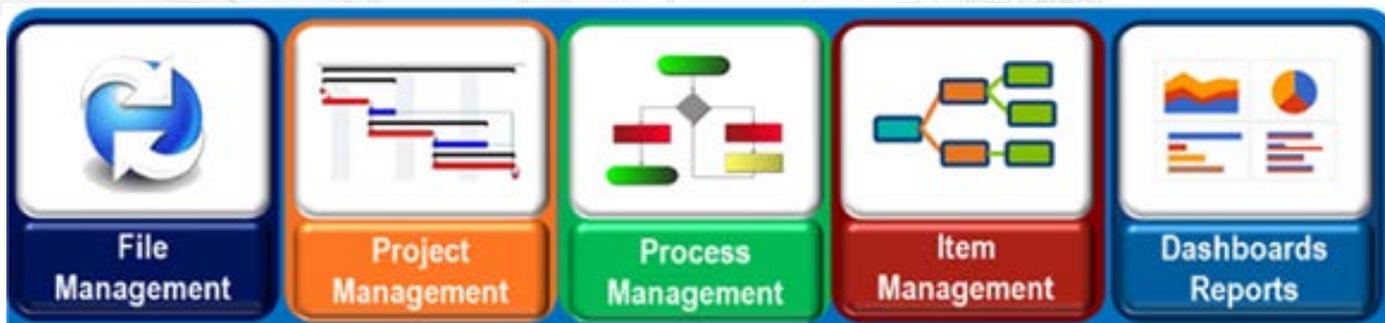
### DIRECCIÓN PROFESIONAL DE PROYECTOS DE INGENIERÍA

### N°Doc: P150617-00A-MAHA-ICMI Rev.2

MAHA ICMI es una empresa estructurada de manera línea funcional que ha consolidado competencias y capacidades para ofrecer servicios de ingeniería en todos sus niveles, desde la etapa preinversional, hasta el desarrollo del proyecto en su etapa de construcción y/o montaje industrial. Compuesta por profesionales con vasta experiencia capaces de liderar y direccionar equipos multidisciplinarios para abordar las necesidades, proyecciones y problemáticas existentes en instalaciones minero-industriales, diseño de procesos e ingeniería hidráulica/piping.

MAHA ICMI entrega servicios en base a los más altos estándares de calidad y distintos niveles de integración (escalables hacia una i4.0) para lograr la conformidad de nuestros clientes y el medio ambiente, bajar costos de construcción y disminución de tiempos de ejecución de obra.

Trabajamos en base a tecnología de última generación que nos proporcionan herramientas para el desarrollo de proyectos ingeniería, control de gestión y avances, disminución de tiempos de respuesta, reducción de costos y aseguramiento de la calidad. Gerenciamiento de proyectos multidimensionales para lograr que nuestros clientes obtengan  **aumentos de eficiencias**  respecto al desarrollo de proyectos y operación de procesos.

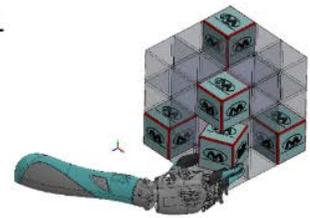




1D	2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D	9D	10D	11D
CONCEPTUALIZACIÓN	VECTORES INGENIERÍA	INTEGRACION 3D (4D)	INTEGRACION PROG. MATRIZ nD	PROYECCIONES (\$)	RENDIMIENTO	OPERACION CONTROL	AMBIENTAL	SEGURIDAD	GERENCIAMIENTO	REPORT ON LINE
INGENIERIA CONCEPTUAL	INGENIERIA BASICA	INGENIERIA DETALLES	INGENIERIA CONSTRUCC.FABRIC.	PRODUCCION COSTOS	SUSTENTABILIDAD EFICIENCIA E.	MANTENIMIENTO ASIGN RECURSOS	SUSTENTABILIDAD EFICIENCIA E.	PREVENCION RIE SG. TOTAL	ADMINISTRACION POM	i4.0



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

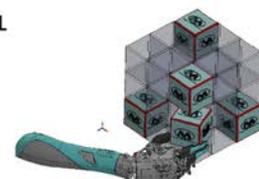


## INDICE

<b>1. SERVICIOS DE INGENIERIA .....</b>	<b>6</b>
1.1 INGENIERIA DE PERFIL - Identificación de necesidades.....	6
1.2 INGENIERIA CONCEPTUAL - Identificación y selección de proy.....	6
1.3 INGENIERIA FACTIBILIDAD – ING. BASICA.....	6
1.4 INGENIERIA DE DETALLES - Validación y desarrollo detallado .....	7
1.5 EJECUCION INVERSIONAL.....	7
1.6 OPERACION .....	7
1.6.1 PRECOMISIONAMIENTO .....	7
1.6.2 MECHANICAL COMPLETION Y COMISIONAMIENTO .....	8
1.6.3 PUESTA EN MARCHA Y MARCHA BLANCA .....	8
1.7 INGENIERIA nD .....	8
1.7.1 BENEFICIOS DEL MODELO nD.....	9
1.7.2 MODELAMIENTO E INTERACCIONES PROYECTO 4D.....	9
1.7.1 BUILDING INFORMATION MODEL (BIM) .....	10
1.7.2 BENEFICIOS MODELOS 4D.....	10
1.8 PROYECTOS EPC / EPCM .....	12
<b>2. EFICIENCIA ENERGETICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 VISION GENERAL .....	13
2.2 ENFOQUE TECNICO.....	14
2.3 NORMA ISO 50001 – PERFORMANCE ENERGETICO.....	15
2.3.1 NORMA ISO 50001 – MODELO DE GESTION ENERGETICA.....	16
2.3.2 GESTION PROFECIONAL DE PROYECTOS EE .....	17
2.4 DESAFIOS.....	18
2.4.1 MEJOR ENTENDIMIENTO DE LA EE .....	21
2.4.2 SENCIBILIDAD EN EL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES.....	22
2.4.3 ENFOCAR ESFUERZOS Y PRIORIDAES.....	23
2.4.4 CULTURA ENERGETICA.....	24
2.5 ANALISIS CONSUMO ENERGETICO - VARIOS.....	25

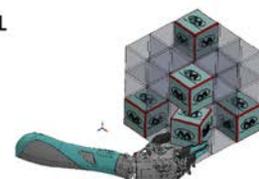


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



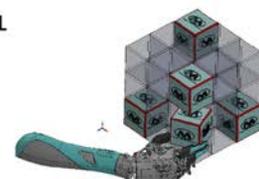


2.5.1	PERFIL ENERGETICO PLANTA SX-EW.....	25
2.5.2	ANALISIS CONSUMO ENERGETICO – MOLINOS Y BOMBEOS.....	26
2.5.3	ANALISIS CONSUMO ENERGETICO – EFICIENCIA DE BOMBAS .....	27
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE PROCESOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	CHANCADO Y MOLIENDA .....	28
3.2	FLOTACION Y CONCENTRADO .....	29
3.3	ESPEADORES DE CONCENTRADOS.....	29
3.4	EXTRACCION POR SOLVENTES.....	30
3.5	PROCESOS TERMICOS .....	31
3.6	AUTOMATIZACION Y CONTROL – ROBOTIZACION DE PROC. ....	32
<b>4.</b>	<b>MODELAMIENTO DE SISTEMAS – PROTOTIPOS DIGITALES 3D .....</b>	<b>33</b>
4.1	SOFTWARE:.....	33
4.2	CODIGOS Y NORMAS.....	33
4.3	ANALISIS DE FLEXIBILIDAD DE TUBERIAS - FAP .....	33
4.4	ANALISIS FLUIDO DINAMICOS – CFD .....	36
4.4.1	APLICACIONES - CFD.....	36
4.5	ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA).....	39
4.5.1	APLICACIONES - FEA .....	40
4.6	ANALISIS POR ELEMENTOS DISCRETOS (DEA) .....	43
4.7	ANALISIS HIDRAULICO TRASNPORTE GRAV. DE RELAVES.....	44
4.8	SIMULACIONES HIDROMETALURGICAS - LIX-SX-EW (LAB) .....	46
4.8.1	PLANTA PILOTO.....	46
4.8.2	PARAMETROS REPRESENTATIVOS .....	46
4.8.3	EQUIPOS.....	47
<b>5.</b>	<b>HIDRAULICA - PIPING .....</b>	<b>48</b>
5.1	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE PIPING - PIPELINE .....	49
5.2	DISEÑOS REDES PARA EL COMBATE DE INCENDIO .....	52
5.3	DISEÑO HIDRAULICOS REDES DE AGUA POTABLE E INDUSTRIALES .....	55
5.4	DISEÑO HIDRAULICOS - TRANSPORTE DE RELAVES Y PULPAS .....	59
5.4.1	CARACTERIZACION DE LAS PULPAS .....	59
5.5	TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES.....	63
5.6	TRANSPORTE DE CELULOSA, SILICE Y CAOLI .....	64
<b>6.</b>	<b>EXTRACCIÓN POR SOLVENTES PARA OBTENCIÓN DE COBRE. ....</b>	<b>66</b>
6.1	GENERALIDAD DEL SERVICIO.....	66
6.2	COMPONENTES PRINCIPALES.....	67
6.3	ALCANCES MAHA ICMI .....	67
6.4	ETAPA DE CHANCADO Y TRITURACION .....	70
6.4.1	ETAPAS Y EQUIPOS .....	70
6.4.2	TAMAÑO DE TRITURACIÓN O CHANCADO Y ELECCIÓN DE EQUIPOS.....	70
6.4.3	DISEÑO DEL PROCESO DE TRITURACIÓN Y CHANCADO .....	73
6.4.4	PRUEBAS DE CHANCADO DEL MINERAL .....	75
6.5	ETAPA DE AGLOMERACIÓN DE MINERAL .....	76
6.5.1	AGLOMERACIÓN POR HUMEDAD.....	78
6.5.2	AGLOMERACIÓN POR ADHERENTES .....	79
6.5.3	CARACTERÍSTICAS Y FACTORES DE LA AGLOMERACIÓN.....	79





6.5.4	PRINCIPALES AGLOMERANTES .....	80
6.5.5	CONDICIONES INICIALES DE AGLOMERACIÓN Y CURADO .....	80
6.6	ETAPA LIXIVIACIÓN EN PILAS (HEAP LEACHING) - LIX .....	84
6.6.1	PARAMETROS DE LA CINETICA DE DISOLUCION .....	89
6.6.2	CONCENTRACIÓN Y DOSIFICACIÓN INICIAL DE ÁCIDO SULFÚRICO .....	98
6.6.3	SULFATOS .....	100
6.6.4	APLICACIÓN DE LA SOLUCIÓN LIXIVIANTE .....	102
6.6.5	LIXIVIACION BACTERIANA DE MINERALES DE COBRE .....	103
6.6.6	SISTEMA DE RIEGO.....	117
6.6.7	RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES .....	119
6.7	ETAPA EXTRACCIÓN POR SOLVENTES - SX.....	121
6.7.1	ETAPAS Y MECANISMOS DE LA EXTRACCIÓN POR SOLVENTE ...	123
6.7.2	AGENTES EXTRACTANTES .....	127
6.7.3	DILUYENTES.....	135
6.7.4	MODIFICADORES.....	138
6.7.5	SOLUCIÓN ACUOSA .....	138
6.7.6	EQUIPOS EN PLANTA DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE.....	139
6.7.7	PARÁMETROS DE LA OPERACIÓN DE PLANTA.....	140
6.7.8	PLANTA PILOTO SOLVENT EXTRACTION – SX.....	141
6.8	ETAPA ELECTRO-OBTENCIÓN DE COBRE - EW .....	143
	REACCIONES PARÁSITAS.....	146
6.8.1	PLANTA PILOTO ELECTROWINN - EW .....	148
6.9	IMPULSION DE FLUIDOS .....	150
<b>7.</b>	<b>ESTRUCTURAS Y OO.CC. ....</b>	<b>151</b>
7.1	INGENIERIA ESTRUCTURAS METALICAS .....	151
7.2	ESTRUCTURAS PESADAS, MEDIANAS Y LIGERAS.....	151
7.3	OBRAS CIVILES (OO.CC) .....	153
7.4	PUNTES GRUA .....	155
7.5	PLATAFORMAS INDUSTRIALES - GRATING Y BARANDAS.....	156





**MAHA**  
INGENIERÍA - CONSTRUCCIÓN - MONTAJE INDUSTRIAL  
**EMPRESA**

DIRECCIÓN PROFESIONAL DE PROYECTOS DE INGENIERÍA  
N°Doc: P150617-00A-MAHA-ICMI  
Página 5 de 159  
I C M I - INGENIERIA  
Rev.2 - 30-09-2017



**GERENCIA DE PROYECTOS**

**DIRECCIÓN PROFESIONAL DE PROYECTOS DE INGENIERÍA**

**I C M I - INGENIERIA**

**MAHA I C M I – INDUSTRIAL/MINERIA**

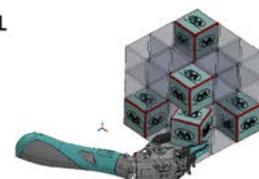
Desarrollado por:	Ricardo Retamal	Gerente Proyectos
Revisado por:	Marcelo Henríquez	Gerente Ingeniería
Aprobado por:	Marcelo Henríquez	Gerente Ingeniería
Toma de Conocimiento:		

Vigencia:	30-09-2017	Revisión:	Rev.2
-----------	------------	-----------	-------

REVISIÓN	TIPO DE CAMBIO	FECHA
A	REVISIÓN MAHA	13-02-17
B	REVISIÓN MAHA	08-02-19
0	PARA USO	30-09-2017
1	PARA USO	



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



## 1. SERVICIOS DE INGENIERIA

### 1.1 INGENIERIA DE PERFIL - Identificación de necesidades

- Identificación de requerimientos
- Proyección de esquemas conceptuales de proceso estático o dinámico.
- Proyección de beneficios

### 1.2 INGENIERIA CONCEPTUAL - Identificación y selección de proy.

- Productos y capacidad de producción.
- Normativa y regulación.
- Descripción del proceso de fabricación y requerimientos de usuario.
- Descripción general de instalaciones.
- Planificación, diagramas de bloques, distribución de instalaciones, planos de flujos de materiales y RR.HH, planos de áreas clasificadas, diagramas de procesos básicos.
- Estimación de requerimientos de servicios auxiliares.
- Lista de equipos preliminar.
- Estimación económica de la inversión.

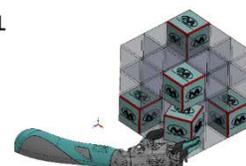
### 1.3 INGENIERIA FACTIBILIDAD – ING. BASICA

Factibilidad (Ingeniería Básica): Desarrollo de proyecto, se consolidan los requerimientos de usuario, las especificaciones básicas y memorias de cálculo, el cronograma de realización y la valoración económica. La aprobación de esta ingeniería debe entregar una sólida base para el desarrollo de la ingeniería de detalle.

- Revisión detallada de la ingeniería conceptual y requerimientos de usuario.
- Hojas de datos de todas las instalaciones proyectadas (críticas y no críticas), Listas de consumos, Listas de equipos.
- Cálculo de cargas térmicas, hidráulicas, neumáticas y estructurales.
- Diagramas de proceso P&ID.
- Flow sheet del proceso.
- Distribución de puntos de uso de servicios y materias primas.
- Layouts de implantación de equipos.
- Balances de masa y energía.
- Routings de tuberías.
- Budget de inversión aproximado.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



- Planificación del proyecto.
- Eficiencia Energética en pos de la protección al medio ambiente.

#### 1.4 INGENIERIA DE DETALLES - Validación y desarrollo detallado

- Validación detallada de la ingeniería básica.
- Especificaciones técnicas de equipos y materiales. Especificaciones funcionales. Especificación de mediciones para petición de ofertas
- Memorias de cálculo.
- Dimensionamiento de conductos, tuberías y válvulas, estructuras, OO.CC e instalaciones eléctricas.
- Listado de equipos, instrumentación, accesorios y materiales.
- Planos de detalle de las instalaciones: Layout de tuberías y conductos, equipos, isométricos, detalles de arquitectura, unifilares eléctricos. Routings de tuberías. Planos 3D.
- Balances de masa y energía, dimensionamiento de equipos e instalaciones.
- Diagramas de proceso P&ID.
- Especificación de mediciones para petición de ofertas.
- Budget de inversión detallado.
- Planificación detallada del proyecto.
- Eficiencia Energética en pos de la protección al medio ambiente.

#### 1.5 EJECUCION INVERSIONAL

Ejecución (Inversional): Construcción, montaje y puesta en marcha de proyecto. Se priorizan aspectos relacionados con plazos, costos, calidad y sustentabilidad.

#### 1.6 OPERACION

Operación: Las instalaciones entran en producción previo paso por las etapas de Precomisionamiento, Mechanical Completion, Comisionamiento, Puesta en Marcha (incluye marcha blanca).

##### 1.6.1 PRECOMISIONAMIENTO

Es el conjunto de actividades de revisión, verificación, documentación y realización de las pruebas y ensayos necesarias para comprobar que todos los Sistemas que conforman el



proyecto fueron correctamente instalados y debidamente probados, tal como exigen las bases de diseño y los manuales de los fabricantes de cada equipo.

### **1.6.2 MECHANICAL COMPLETION Y COMISIONAMIENTO**

El completamiento mecánico confirma a través de un Certificado extendido por El Cliente o su Ingeniero, que los equipos y sistemas que componen la Planta estén completos y hayan sido construidos e instalados de acuerdo a la información y especificaciones finales de Diseño, las recomendaciones de los fabricantes y respetando la Normas y Regulaciones cuya aplicación es exigible contractualmente para el proyecto, o que son parte de las buenas prácticas de Ingeniería utilizables. Con este Certificado la Planta o un sistema en particular están listos para comenzar las siguientes actividades de Comisionamiento.

El fin del Comisionamiento es de garantizar que los sistemas que conforman el proyecto, interactúen entre sí de acuerdo a los diseños, normas, requerimientos del cliente y recomendaciones de los fabricantes, estando expeditos para iniciar las actividades de Puesta en Marcha de la Planta.

### **1.6.3 PUESTA EN MARCHA Y MARCHA BLANCA**

Consiste en verificar que las instalaciones como un todo operan de acuerdo con las condiciones de diseño, procediendo gradualmente a poner las instalaciones en operación paso por paso y de un modo controlado, seguro y confiable hasta que estas alcancen las condiciones normales de operación y la producción se haya estabilizado (Rump Up). En esta etapa se efectúan las pruebas de performance para verificar el cumplimiento de los parámetros garantizados.

## **1.7 INGENIERIA nD**

Su objetivo es retratar y visualizar el proyecto entero, desde el diseño hasta la construcción, permitiendo así a los usuarios ver y simular el ciclo de vida del proyecto. Esto busca mejorar el proceso de toma de decisiones y el desempeño de construcción permitiendo un análisis mas profundo de toda la gestio y desarrollo, comparar indicadores respecto de otros proyectos desarrollados, etc. Uso de modelos virtuales y multidisciplinarios de proyectos de diseño y construcción, incluyendo modelos de productos, procesos y organizaciones, para apoyar los objetivos de negocio explícitos y públicos.



- 2D Superficie: Describe y predice la ubicación o lugar.
- 3D Espacio: Alcance del proyecto en forma digital y visual (espacial).
- 4D Tiempo: Controla visualmente el avance del proyecto, detecta elementos no planificados, control visual del proyecto, comparación del avance programado v/s avance real, detección de atrasos de actividades, forma de trabajo más sencilla y eficaz que hacer control directamente, desde el software de programación.
- 5D Secuencia constructiva y Estrategia de ejecución
- 6D Cubicación y Cantidad: Proyección de cantidades para determinar el cumplimiento de algún hito y gestión logística. Predicción de la utilización de materiales, organiza y filtrar información de cantidades en forma rápida y confiable.
- 7D Costo: Predice costos de actividades o del proyecto a una determinada fecha.
- 8D Seguridad e Historial de Desempeño: Se Predice situaciones riesgosas. Muestra porcentajes de avance programado y real, y causas de no cumplimiento de actividades. Estos dos conceptos mencionados den trabajar juntos para un aseguramiento de la calidad en todo aspecto.

### 1.7.1 BENEFICIOS DEL MODELO nD

- Mejor entendimiento del proyecto por parte del mandante, diseñadores y constructores.
- Menores reprocesos de diseño.
- Eficiente coordinación de especialidades. Actualización periódica del modelo.
- Análsis de interferencias. Detección de colisiones.
- Entrega de un modelo que podrá ser utilizado por el cliente en la operación Manejo de información asociada.
- Definición de parámetros y asociación a elementos. Encontrar fácilmente los elementos.
- Hacer conteos o sumas de propiedades.
- Creación de documentación final más rapido. Especificaciones asociadas a elementos.
- Vistas 3D con rotaciones, creación de isométricos.
- Estimaciones de costo exactas.
- Interoperabilidad con CAD. Hipervinculos

### 1.7.2 MODELAMIENTO E INTERACCIONES PROYECTO 4D

3D es un modelo de producto, en el que se representa tridimensionalmente la obra. Permite visualizar como será la construcción final. Si al modelo 3D le agregamos la programación del



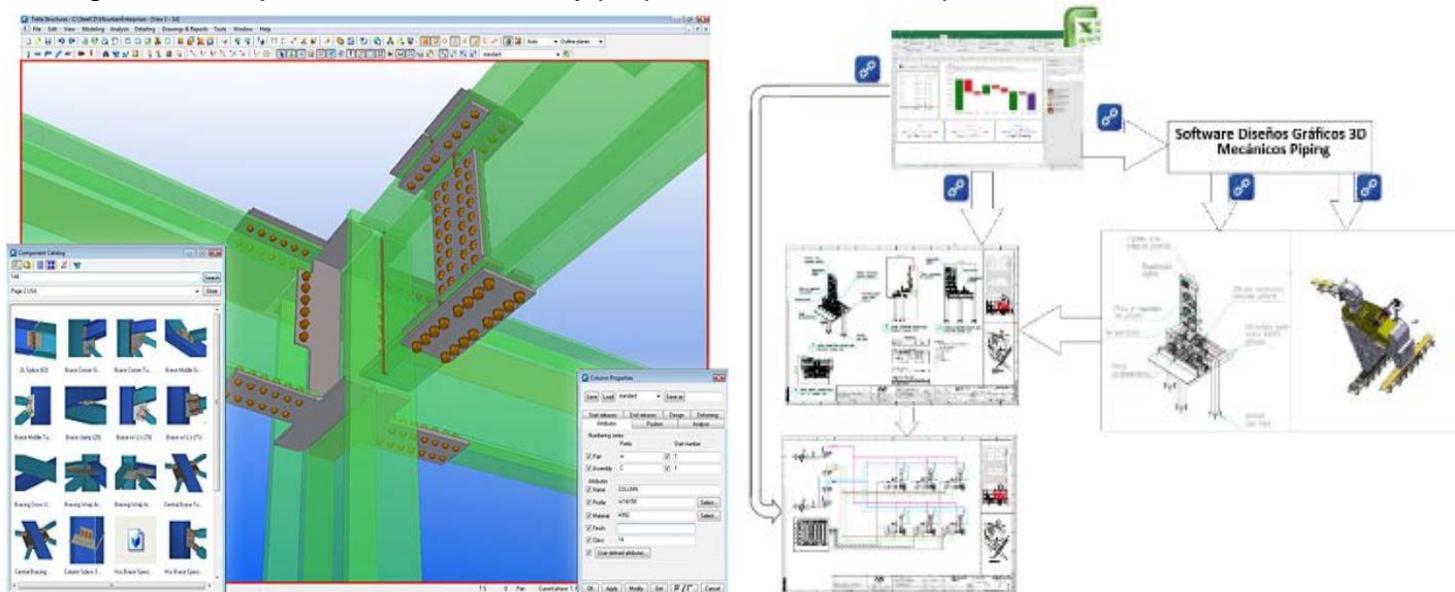
proyecto (variable tiempo, cuarta dimencion 4D) lo cual permite visualizar el avance en períodos de tiempo intermedios.

En el proyecto pueden existir cambios (**interacciones**) tanto en el modelo como en la planificación por lo cual se debe iterar 3 etapas de cualquier proyecto de ingeniería y construcción:

- Actualizar el modelo
- Segmentar el modelo
- Mejorar el plan

### 1.7.1 BUILDING INFORMATION MODEL (BIM)

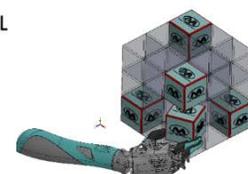
Un BIM es una fuente de información compartida de un proyecto conformando una base confiable para la toma de decisiones durante su ciclo de vida. Esta gestión de información (bases de datos) abarca la geometría del edificio, las relaciones espaciales, la información geométrica, junto a las cantidades y propiedades de sus componentes, entre otros elementos.



### 1.7.2 BENEFICIOS MODELOS 4D

Los beneficios mas notorios en trabajar con modelos 4D son:

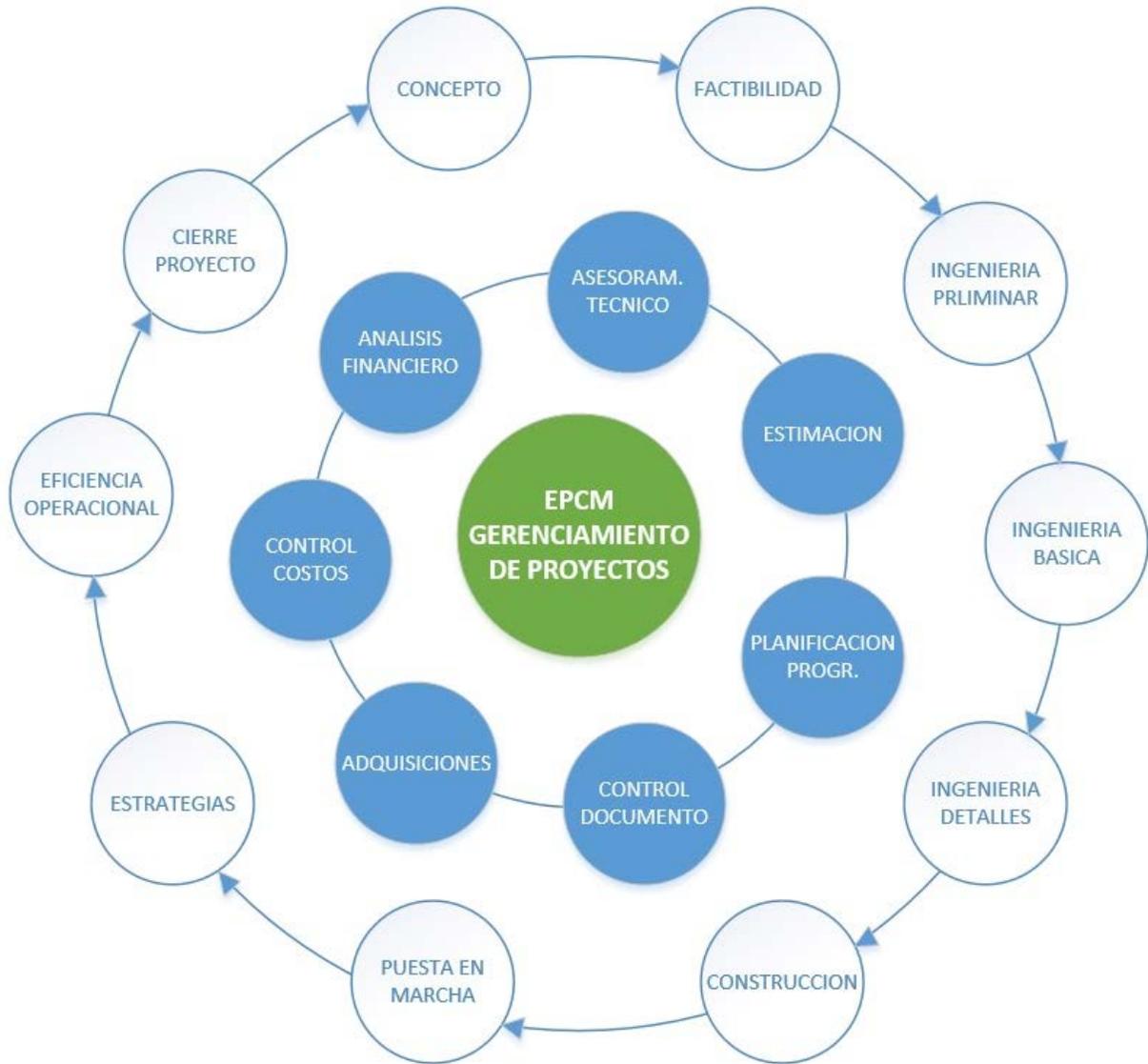
- Mejoras continuas al plan maestro
- Aumento de la transmisión de los objetivos del Proyecto



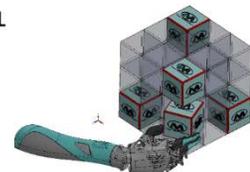
- Mayor conciencia de trabajos y atrasos
- Entendimiento de riesgos presentes o por venir
- Disminución de los tiempos de gestión y reuniones de ingeniería.
- Evaluación temprana de conflictos: Al cotejar la información desde el comienzo del proyecto podemos detectar posibles conflictos en las distintas etapas del proceso.
- Evita retrasos y costos adicionales: Al visualizar los procesos con antelación prevenimos problemas sin mayores costos ni retrasos inesperados.
- Aumenta y optimiza el tiempo: En proyectos integrados aporta información para la administración, clarificando las tareas pendientes en cada etapa.
- Permite visualizar cambios simultáneos: Podemos estimar las repercusiones de cada solución en las distintas áreas, sin improvisar nuevos modelos.
- Mejora la organización y el seguimiento: Permite proyectar el calendario del proyecto y realizar un seguimiento.
- Facilita la estimación de recursos: Es más fácil desarrollar el presupuesto y control de obra cuando toda la información está en sobre la mesa y es fácil de revisar.
- Permite evaluar la sustentabilidad de la obra: Facilita el cálculo de la eficiencia energética del edificio y sus instalaciones.



## 1.8 PROYECTOS EPC / EPCM



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 2. EFICIENCIA ENERGETICA

### 2.1 VISION GENERAL

#### Situación actual presenta:

- Alzas en el precio de la energía
- Inversiones adicionales por escasez de agua
- Mayor Grado de madurez en minas (menores leyes)
- Mayor Sensibilidad medio ambiental

#### Protocolo de Acuerdo para la Eficiencia Energética en la Gran Minería (CNE Nov. 2008)

#### EE logra:

- Mejorar la competitividad de los sectores productivos
- Mejorar la imagen corporativa frente a la comunidad
- Reducir las necesidades de generación
- Disminuir la contaminación local y la huella de carbono
- Desplazar inversiones y utilizar eficientemente los recursos Energéticos

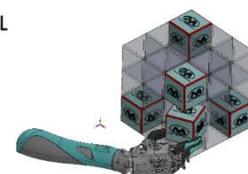


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



[www.maha.cl](http://www.maha.cl)

[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)





## 2.2 ENFOQUE TECNICO

### Eficiencia Energética:

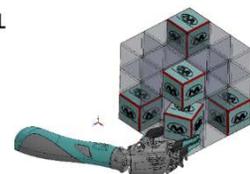
“El conocimiento vinculado con políticas, estrategias, tácticas, o acciones combinadas y coordinadas, que tienen el propósito, en el ámbito del proceso productivo, mantener los mismos niveles de **producción**, consumiendo una **menor cantidad de energía**. Ello no debe significar en ningún caso ir en desmedro de la **calidad** del bien o producto obtenido, como tampoco aumentar el **riesgo** del proceso, fuera de parámetros admisibles”.

### Expresión:

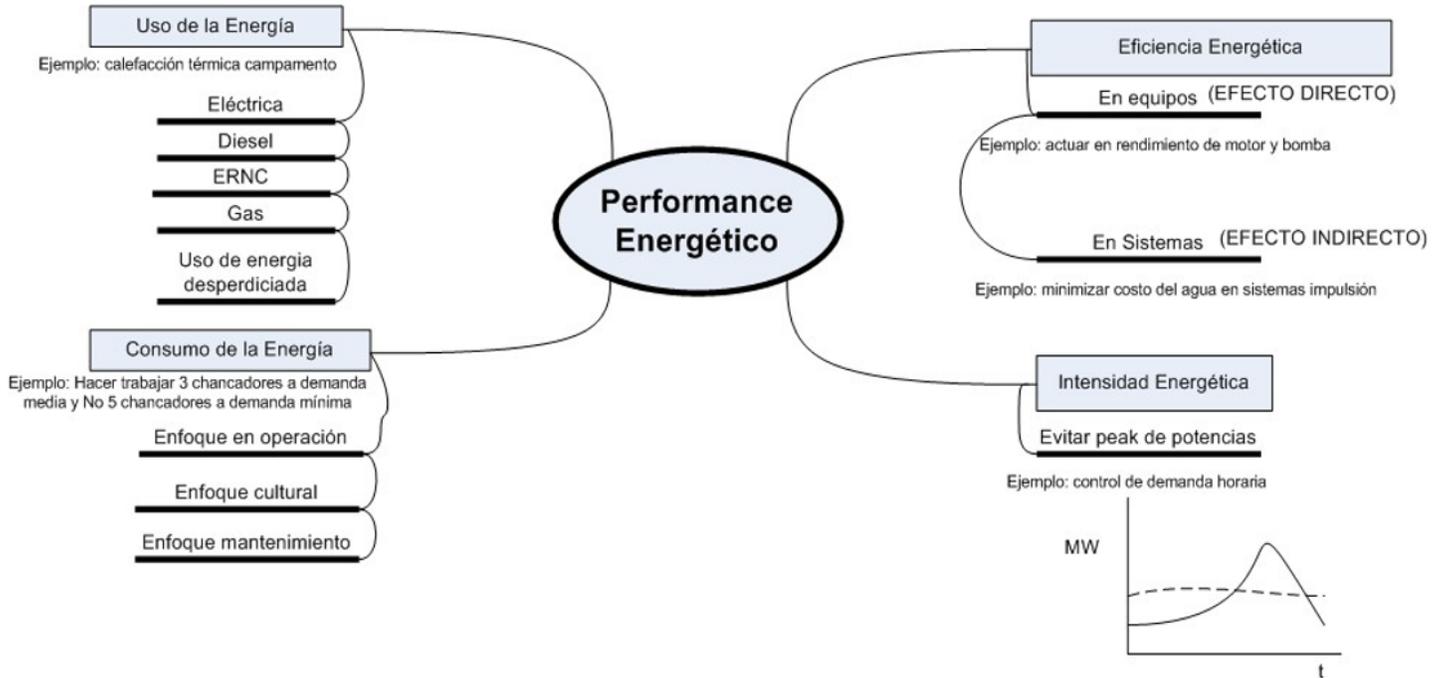
$$EE = \frac{E_{consumida} + E_{recuperada}}{E_{consumida} + E_{perdida}}$$



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



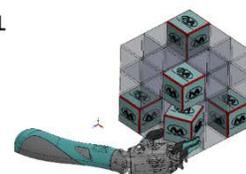
### 2.3 NORMA ISO 50001 – PERFORMANCE ENERGETICO



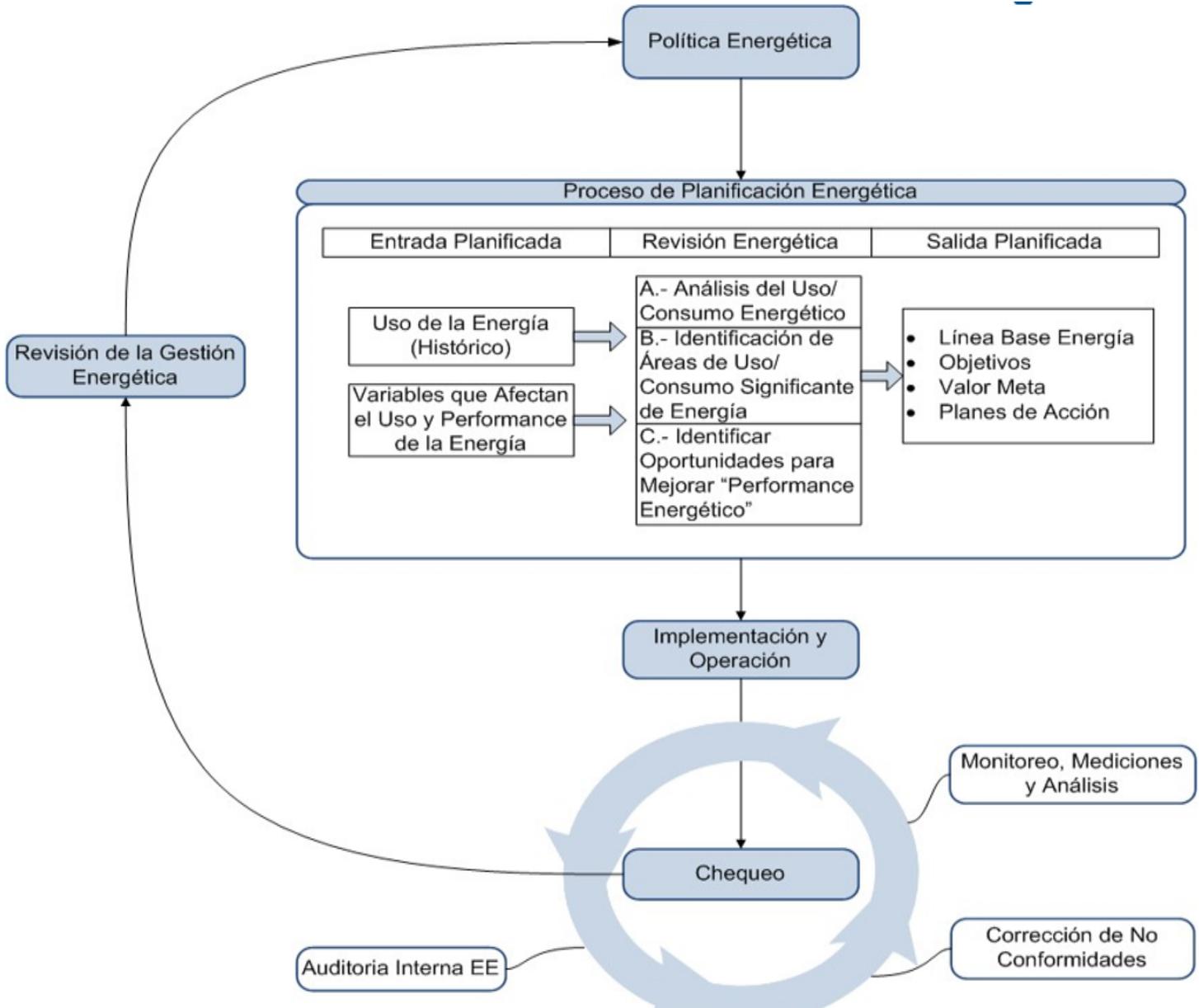
La evaluación de oportunidades debe enfocarse a alternativas indirectas (EE en sistemas) y a la definición del sistema a evaluar



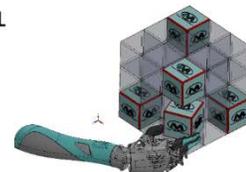
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



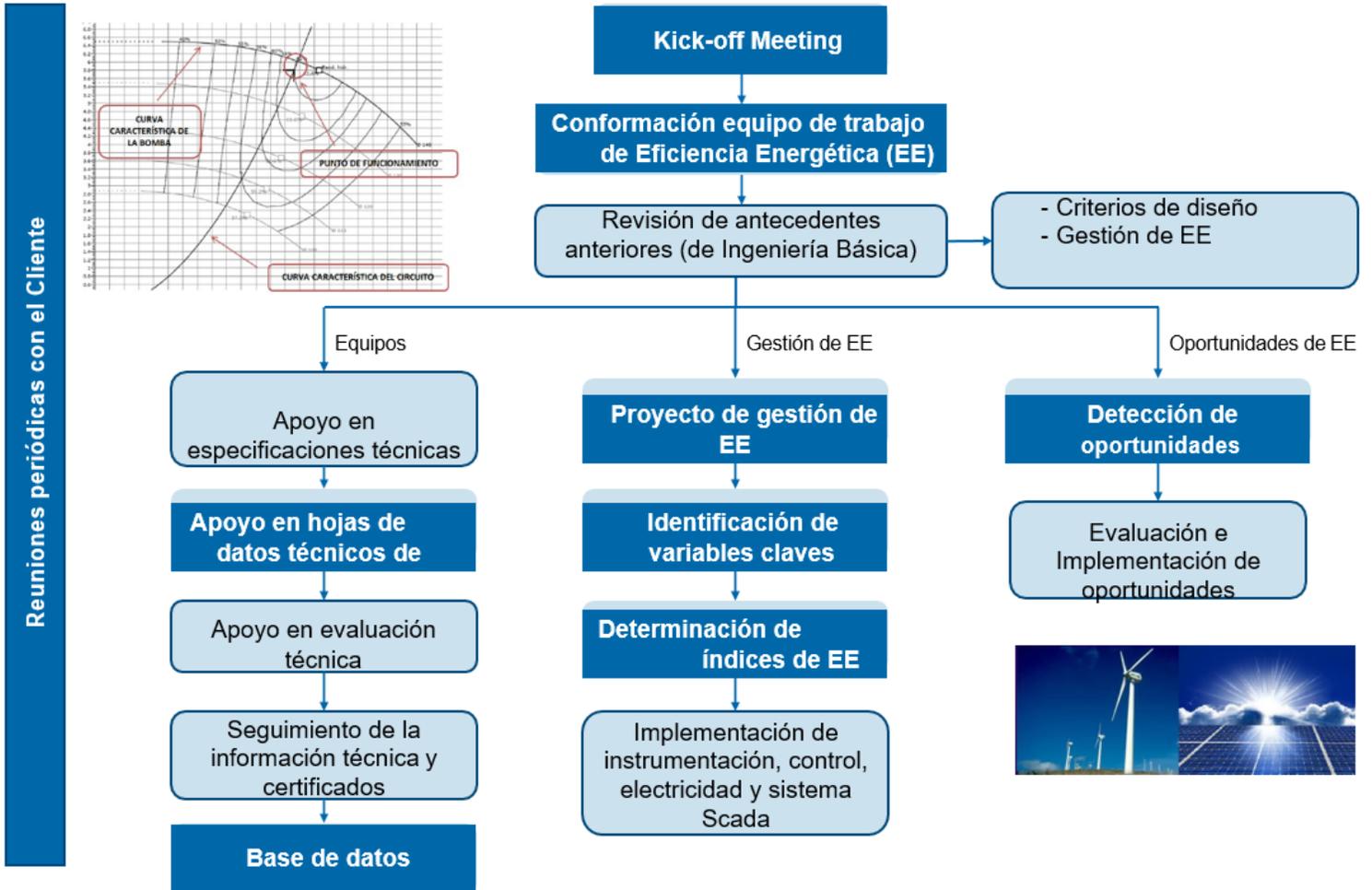
### 2.3.1 NORMA ISO 50001 – MODELO DE GESTION ENERGETICA



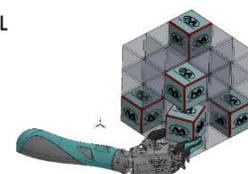
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



### 2.3.2 GESTION PROFECIONAL DE PROYECTOS EE



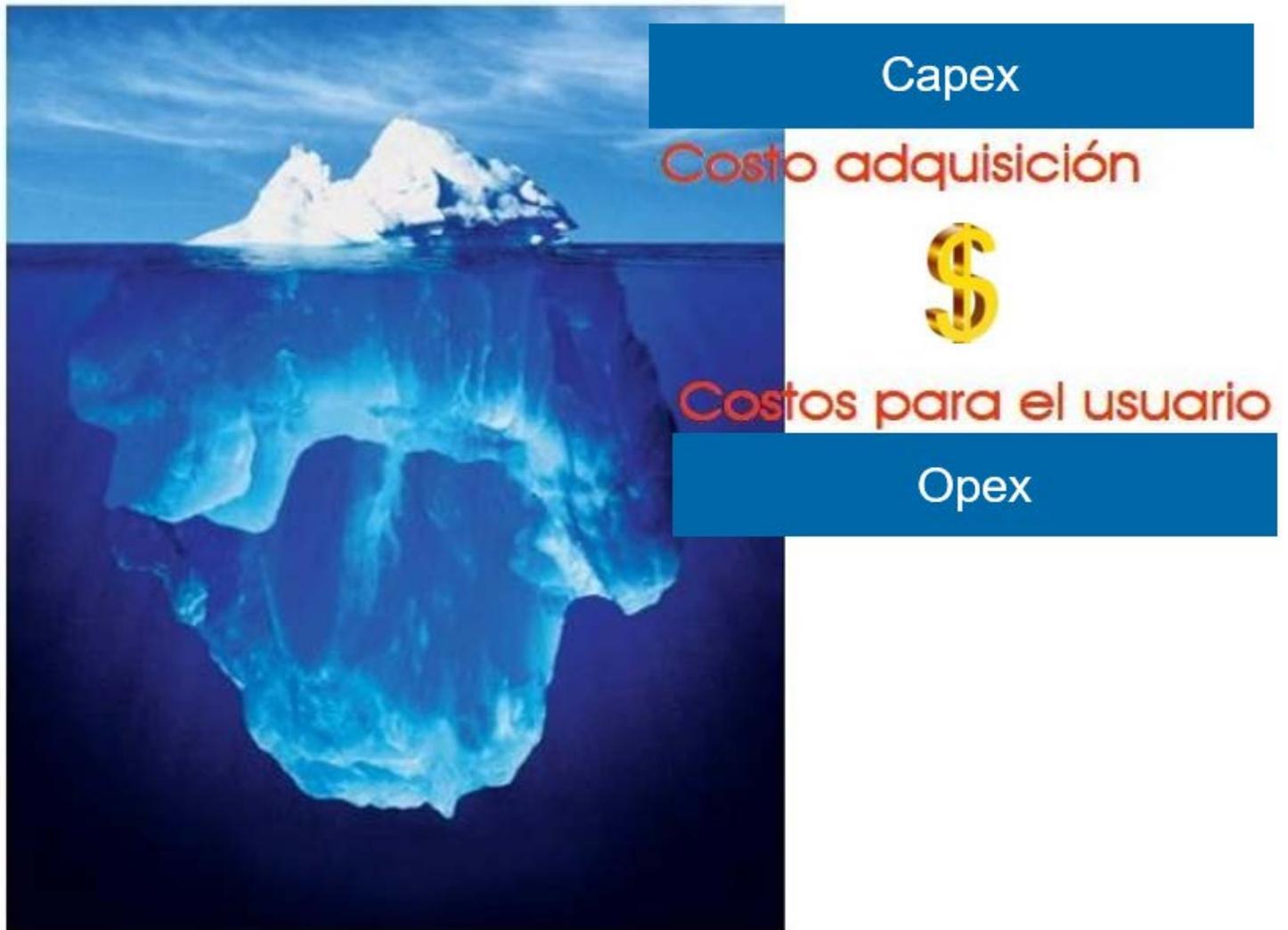
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



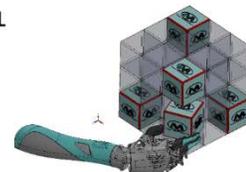


## 2.4 DESAFIOS

- Lograr difundir un mejor entendimiento de la EE en el equipo de proyecto
- Sensibilizar la toma de decisiones de clientes considerando la EE
- Enfocar esfuerzos en EE a lo más relevante



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





Herramientas de Gestión de Información de Eficiencia Energética > Reporte de Consumo de Energía

Visualizador General de Desempeño Energético

Tendencias de Eficiencia Energética

Reporte de Consumo de Energía

Reporte de Ahorro de Energía

Ingreso Manual de Datos

Otras opciones

Exportar Imprimir

Opciones de Análisis

Tipo de Análisis

- Diario
- Semanal
- Mensual**
- Anual

Incluir Análisis de Turnos

Especificar Período de Análisis

Desde: 01/01/2011  
Hasta: 31/12/2011

Selector de TAGs

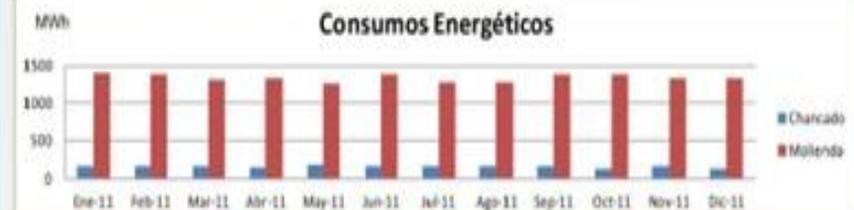
Seleccione Límite de Bateria

- Consumo Total (Facturación)
- Mina
- Concentradora Chancado
- Molenda
- Flotación y Limpiezas
- Espesamiento Concentrado
- Filtrado
- Rec. Agua e Impulsión Relave
- Complejo Tostación y Planta de Ácido
- Infraestructura

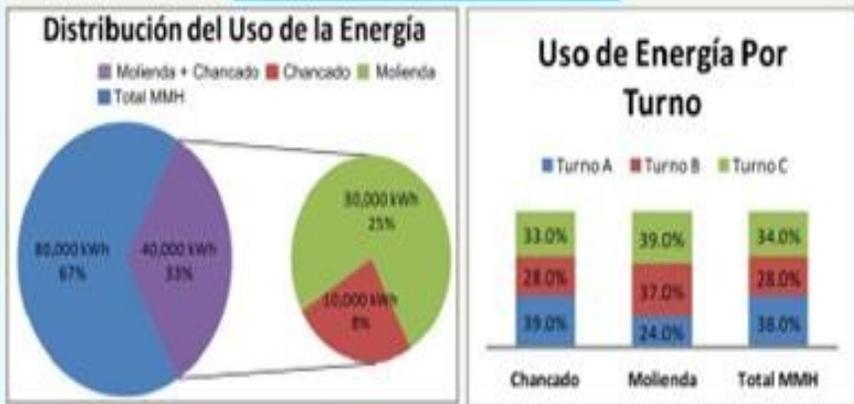
Tabla de Datos

Límite de Bateria	01/11	02/11	03/11	04/11	05/11	06/11	07/11	08/11	09/11	10/11	11/11	12/11	Total
Chancado MWh	150												
Turno A %	33												
Turno B %	28												
Turno C %	39												
Molenda MWh	1300												
Turno A %	39												
Turno B %	37												
Turno C %	24												
<b>Sub Total</b>	<b>1450</b>												

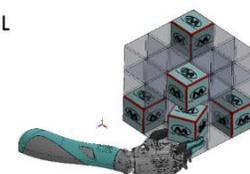
Área de Gráfico (Serie de Tiempo)

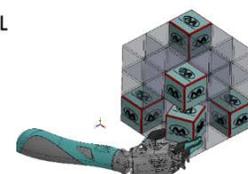
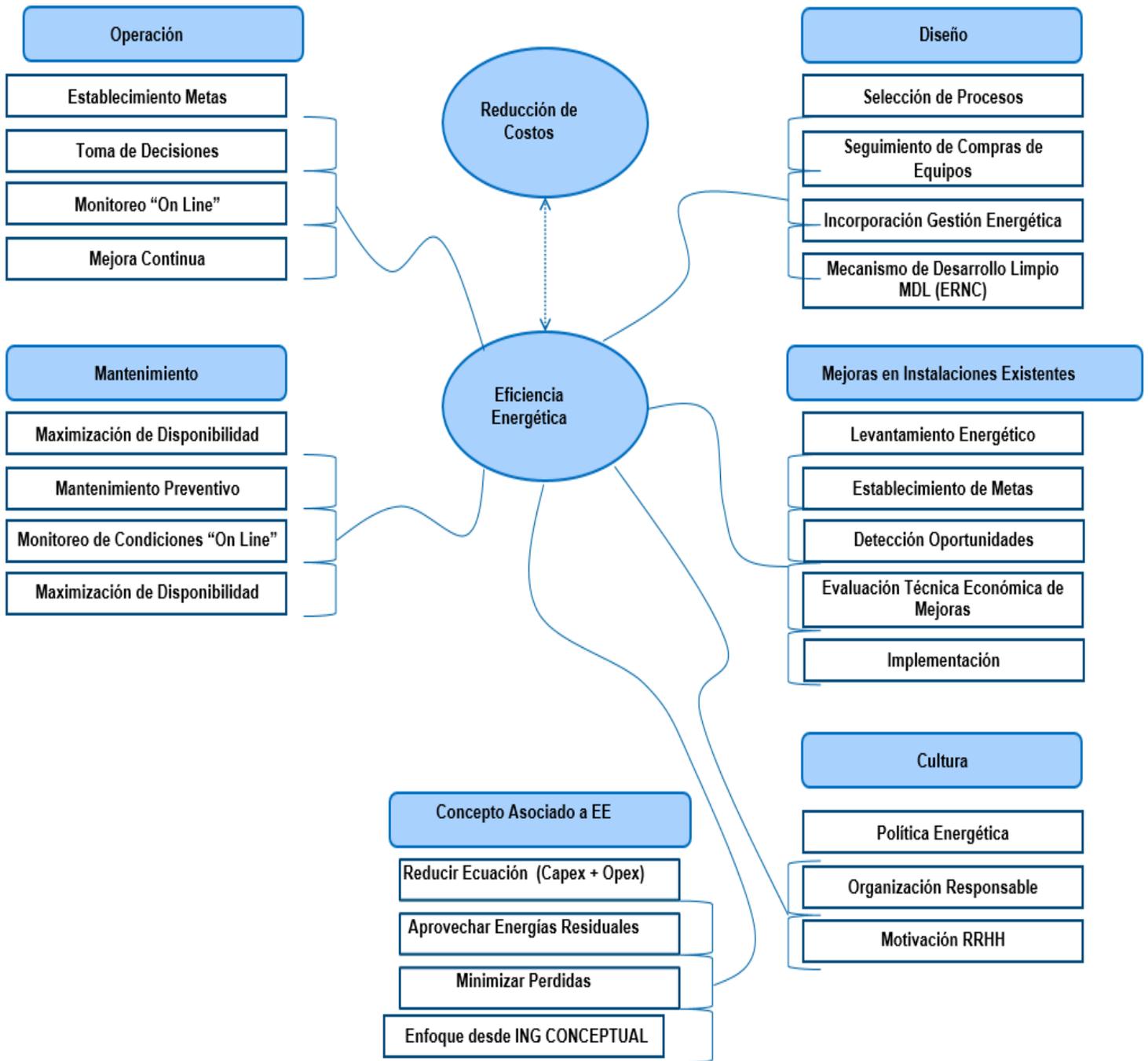


Área de Gráfico (Totales)



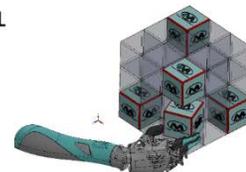
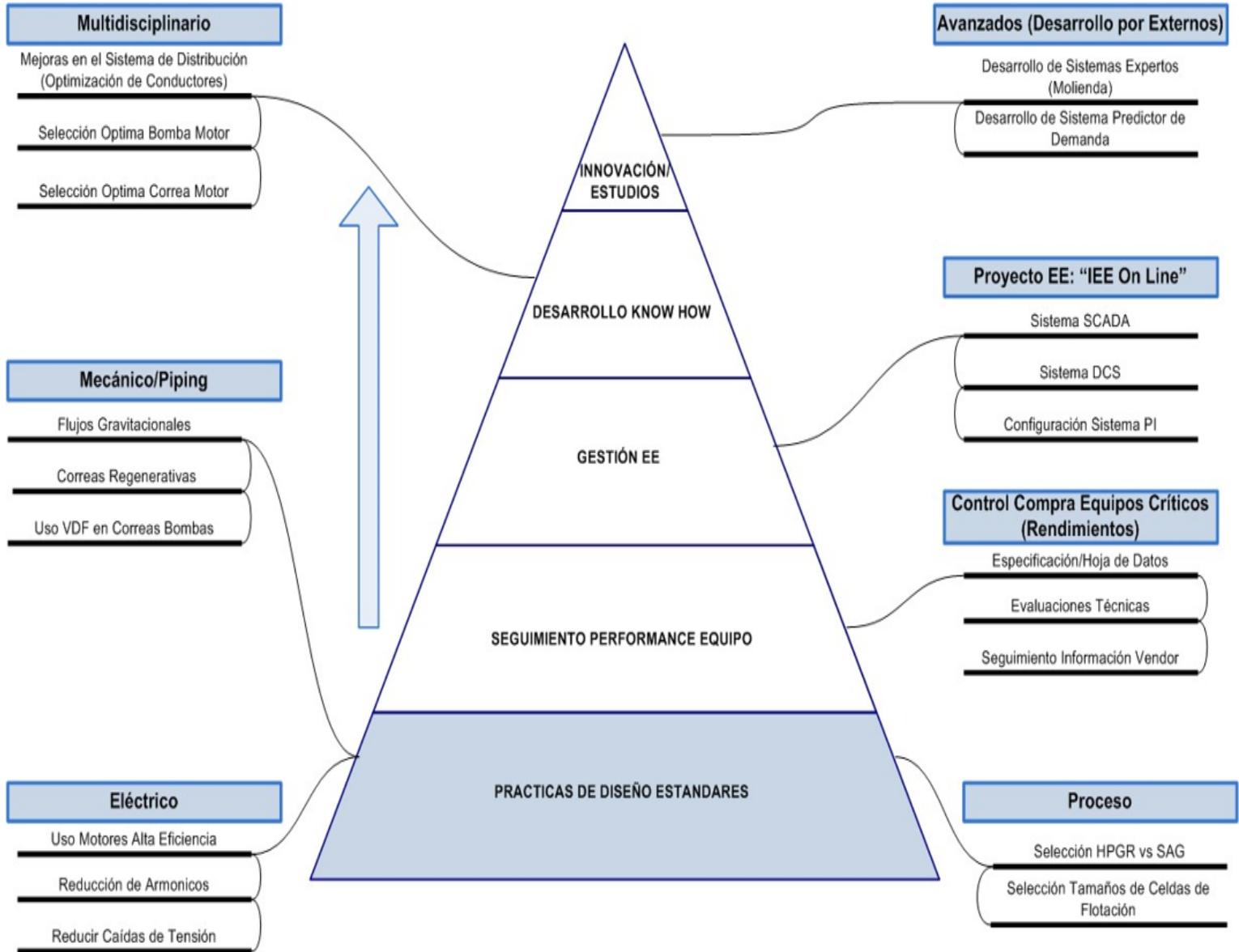
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL







### 2.4.1 MEJOR ENTENDIMIENTO DE LA EE





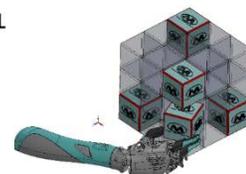
### 2.4.2 SENCIBILIDAD EN EL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES

DISCIPLINA	CRITERIO GENERAL		CRITERIO EE
DISEÑO	GENERAR UN DISEÑO ROBUSTO	↔	EVITA EL SOBREDIMENSIONAMIENTO
RIESGO	CONSERVADOR TECNOLOGIA PROBADAS	↔	DESARROLLOS DE PUNTA NUEVAS TECNOLOGIAS
GESTION	REDUCIR CAPEX	↔	REDUCIR OPEX
CONSTRUCTIBILIDAD	MODULACION RECINTOS	↔	DISENOS ESPECIFICOS CON APROVECHAMIENTO: LUZ NATURAL, VIENTOS, ETC
MANTENIBILIDAD	ESTANDARIZACION EQUIPOS	↔	EQUIPOS DIMENSIONADOS A OPERAR EN EL PUNTO DE MAYOR RENDIMIENTO
OPERACION	FLEXIBILIDAD	↔	EVITAR LA VARIABILIDAD



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

  
www.maha.cl  
✉ maha@maha.cl / 📞 +569-78785939





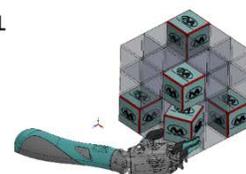
### 2.4.3 ENFOCAR ESFUERZOS Y PRIORIDADES

**Green Field**

**Brown Field**

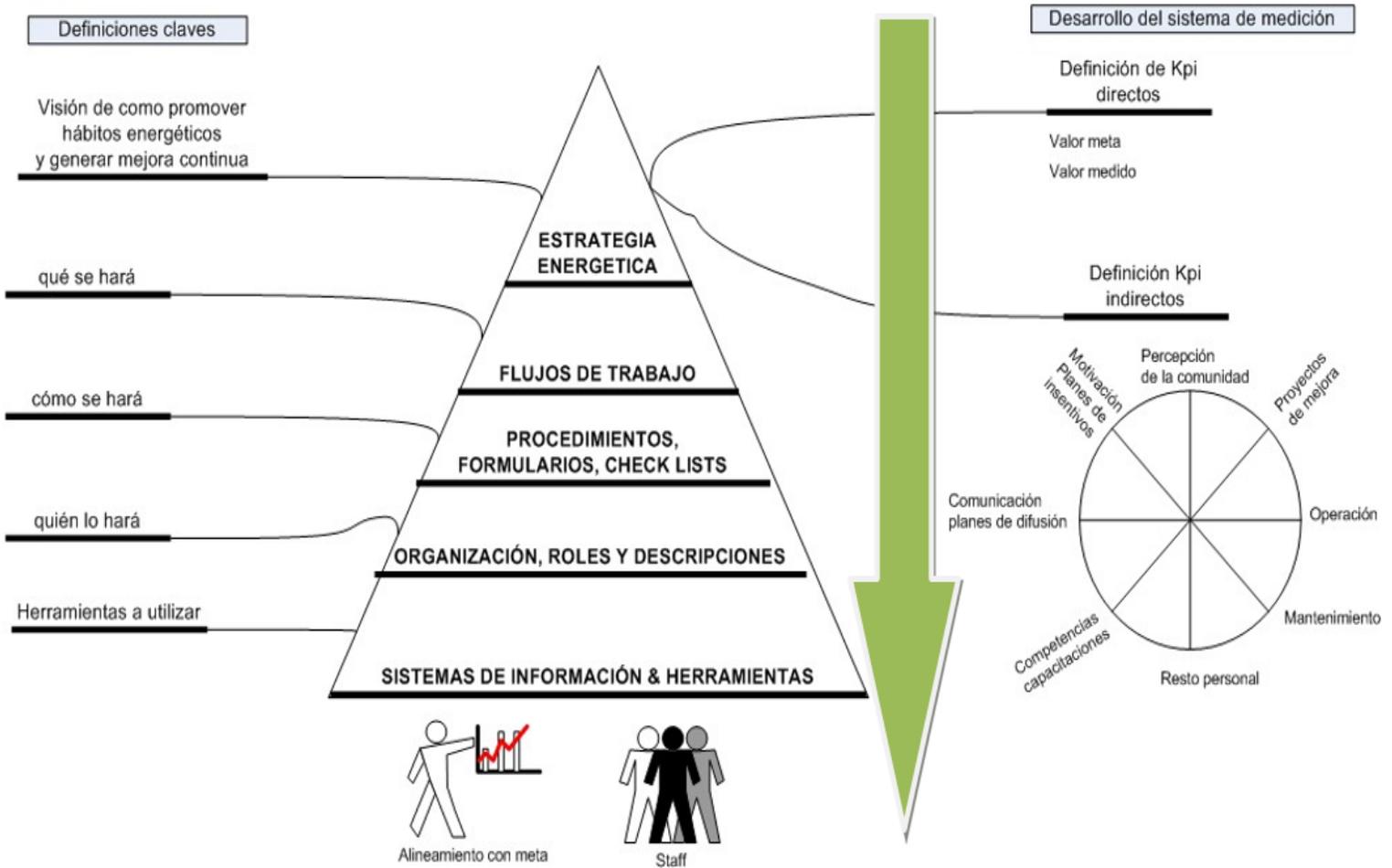


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

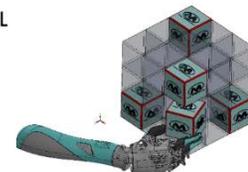




### 2.4.4 CULTURA ENERGETICA



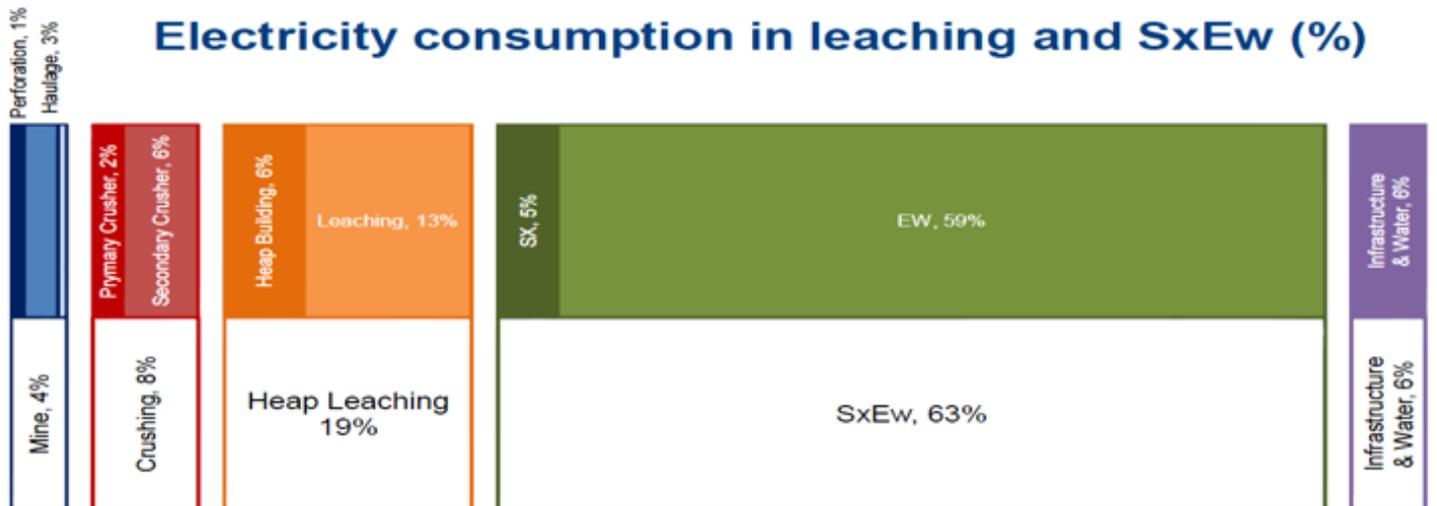
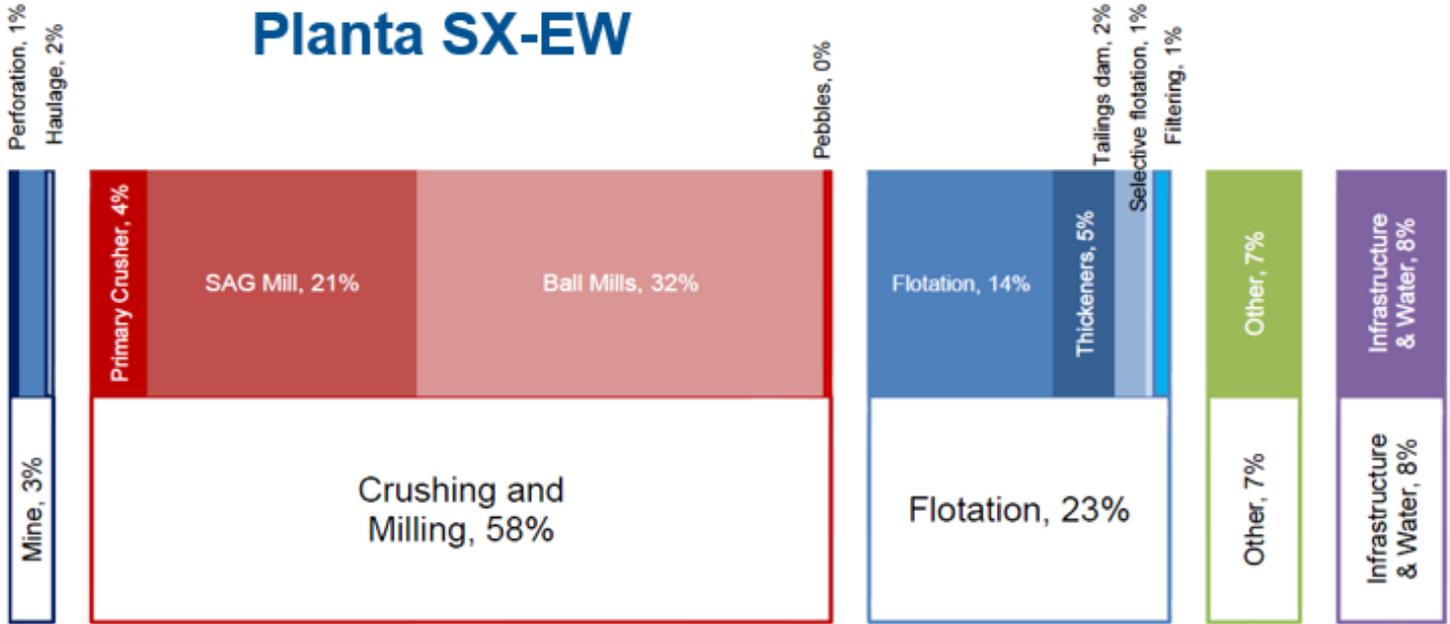
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



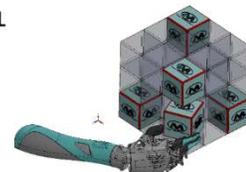


## 2.5 ANALISIS CONSUMO ENERGETICO - VARIOS

### 2.5.1 PERFIL ENERGETICO PLANTA SX-EW

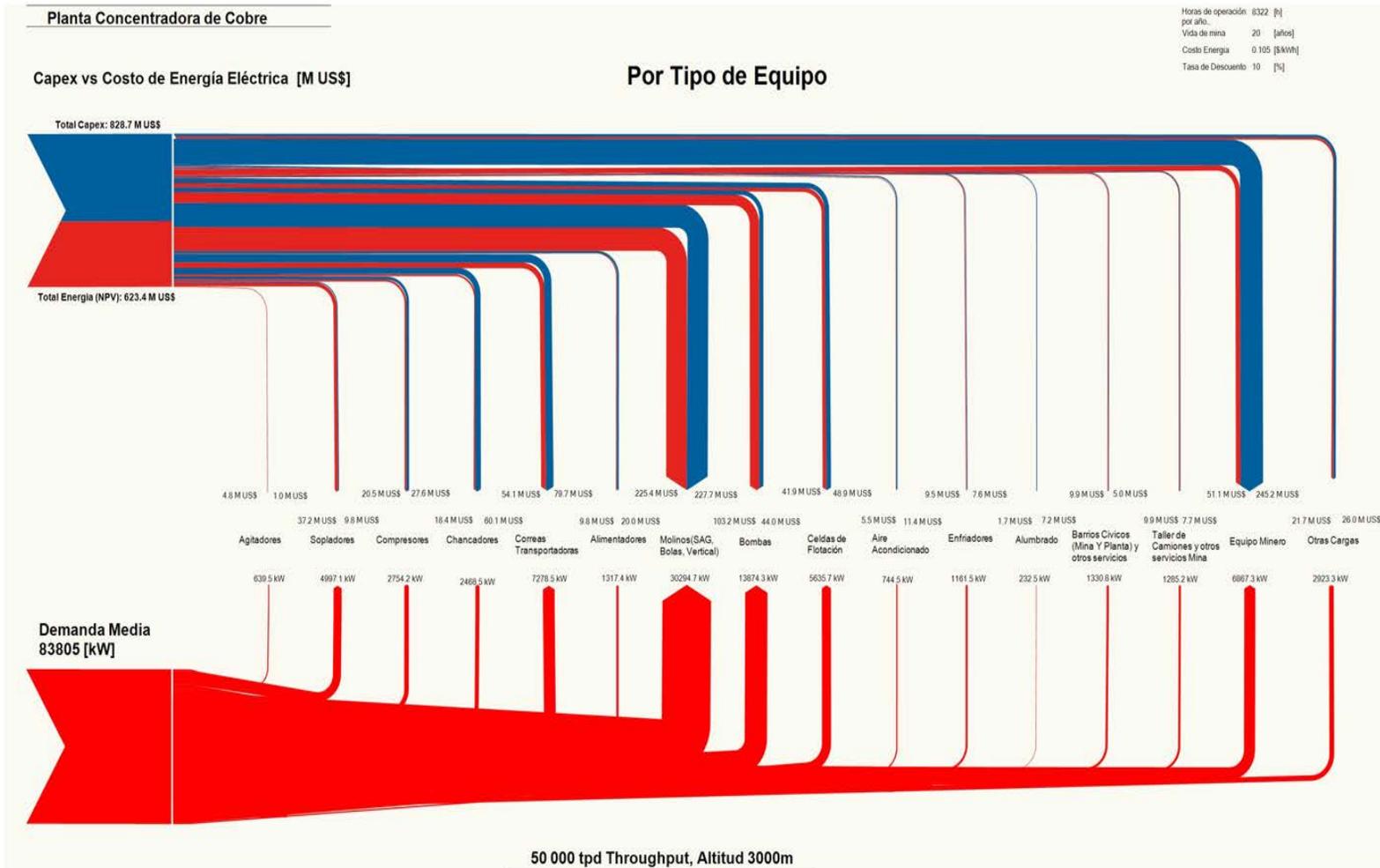


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

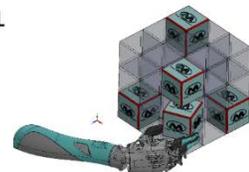




## 2.5.2 ANALISIS CONSUMO ENERGETICO – MOLINOS Y BOMBEOS

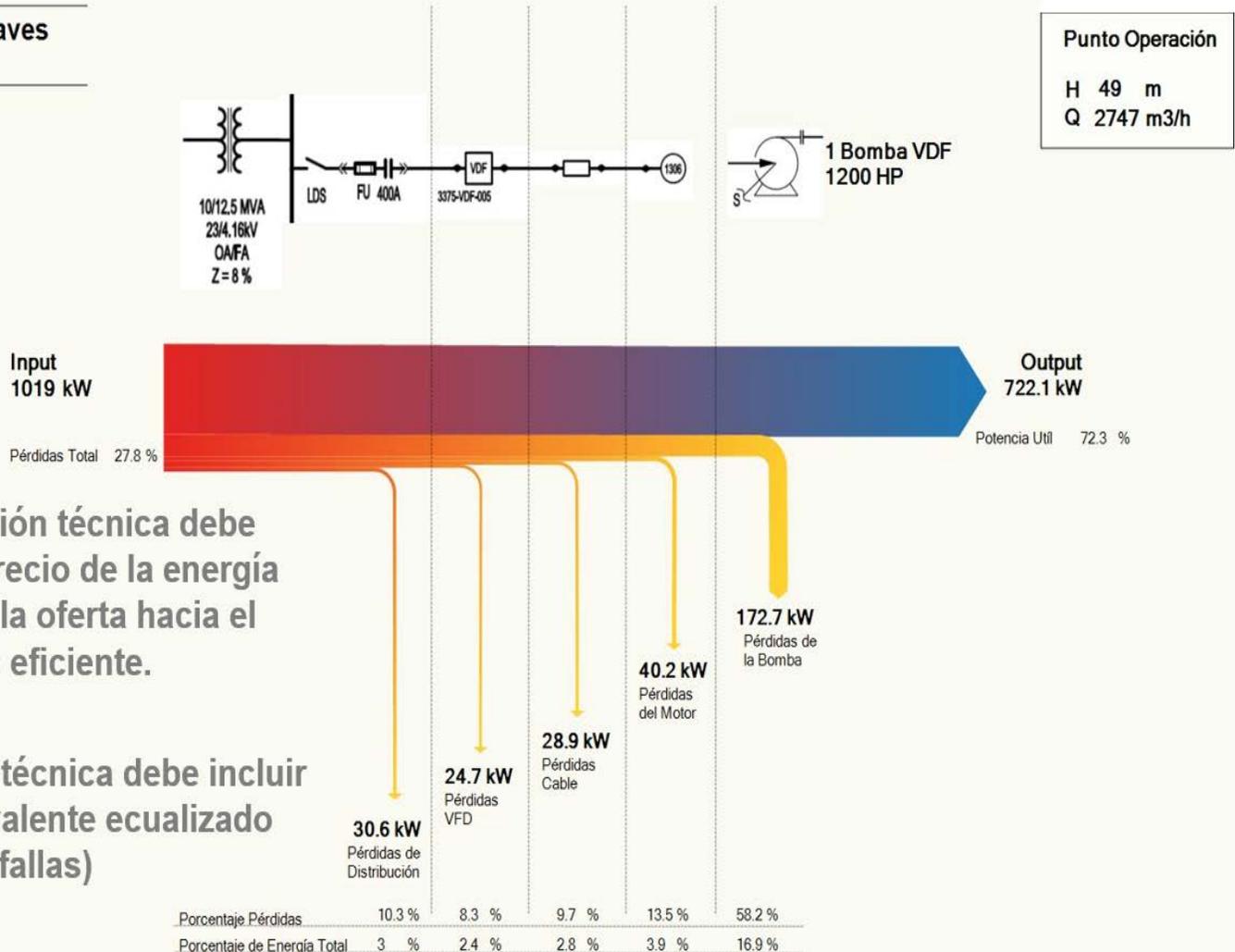


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



### 2.5.3 ANALISIS CONSUMO ENERGETICO – EFICIENCIA DE BOMBAS

#### Bomba de Relaves

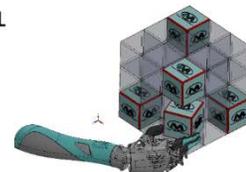


- Especificación técnica debe incluir el precio de la energía para dirigir la oferta hacia el equipo más eficiente.

- Evaluación técnica debe incluir costo equivalente ecualizado (eficiencia, fallas)



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





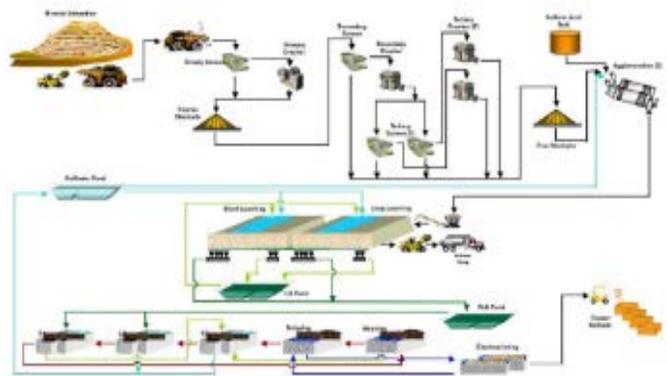
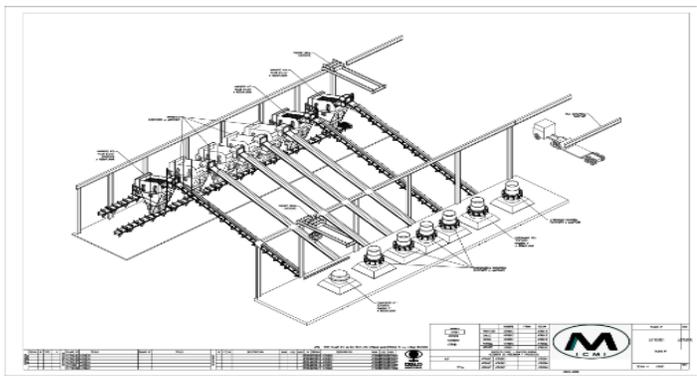
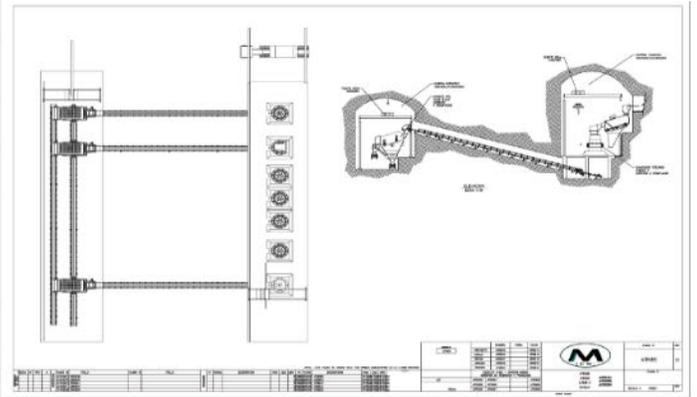
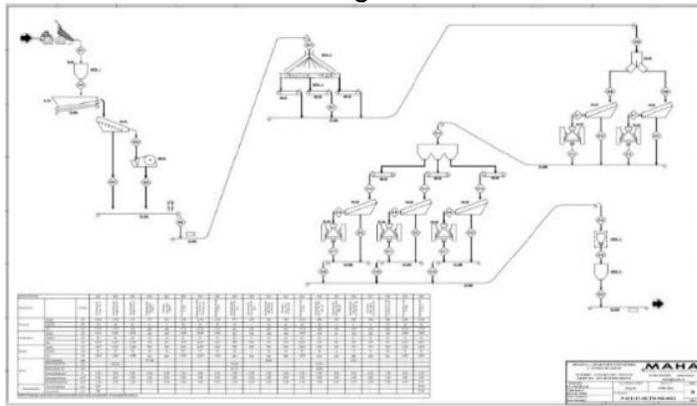
### 3. DISEÑO DE PROCESOS



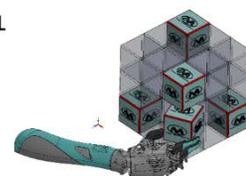
Diseño de Lay Out, equipos e instalaciones (Ingeniería de Procesos), se logra integrar el dimensionamiento de los equipos, balances de masa, eficiencias energéticas, etc.

#### 3.1 CHANCADO Y MOLIENDA

- Dimensionamiento sistema de transporte chancado y molienda.
- Balances de masa
- Diagramas de flujo
- Eficiencias energéticas

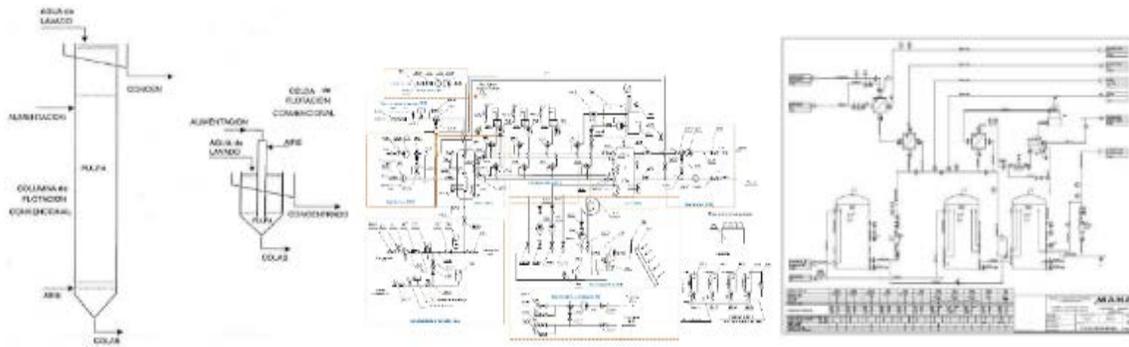


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



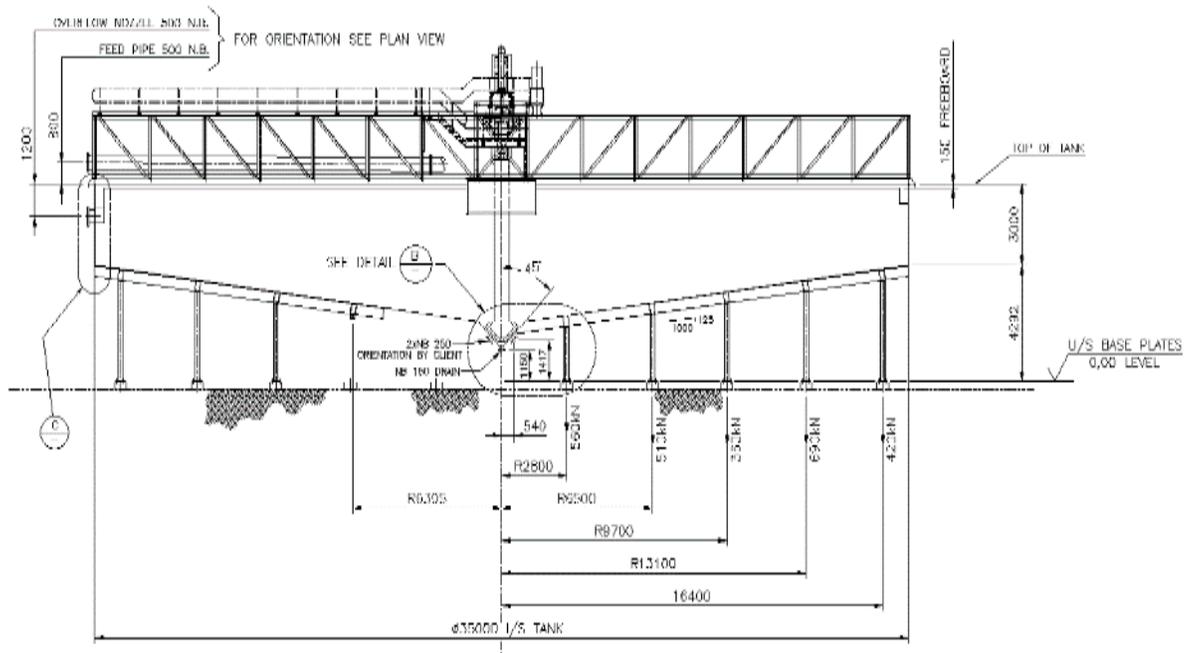
### 3.2 FLOTACION Y CONCENTRADO

- Flotación celdas escalonadas
- Flotación celda de columna
- Selección de equipos gestión de adquisiciones.
- Dimensionamiento sistema hidráulico de operación.

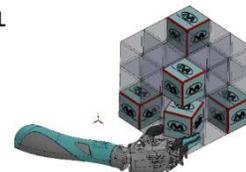


### 3.3 ESPESADORES DE CONCENTRADOS

- Selección de equipos gestión de adquisiciones.
- Dimensionamiento sistema hidráulico de operación.



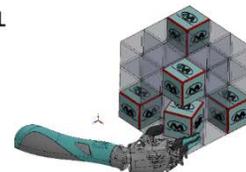
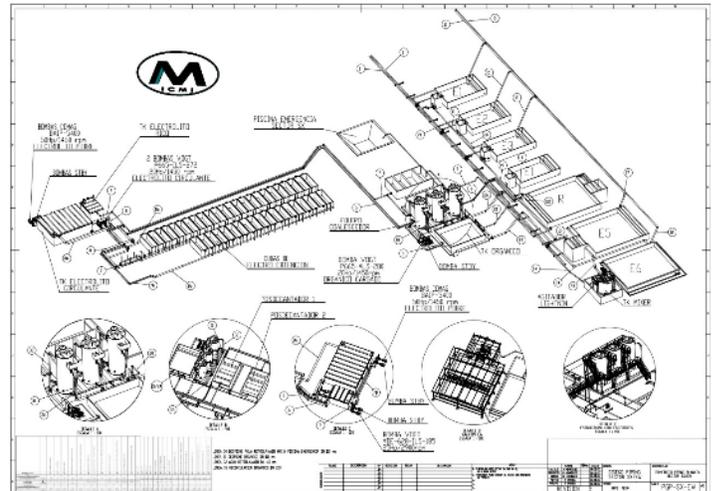
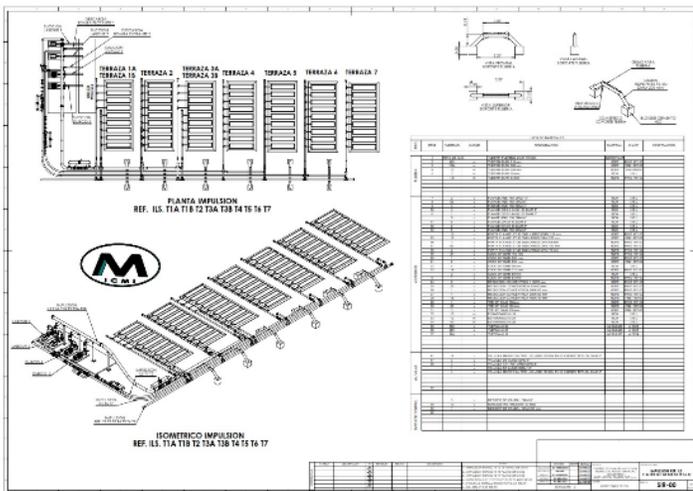
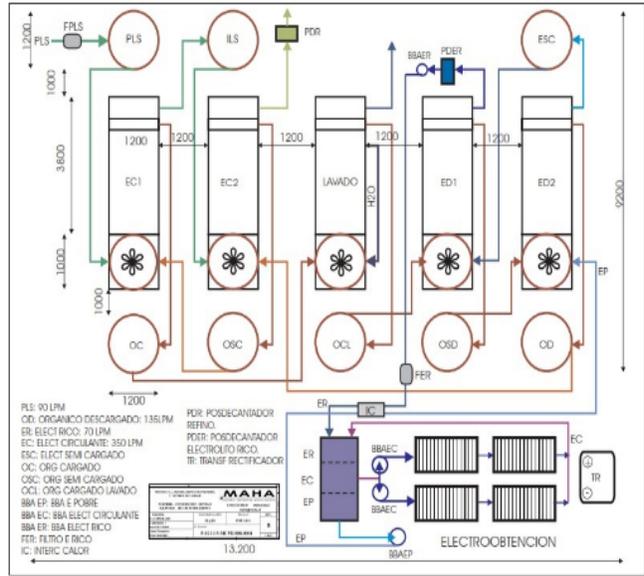
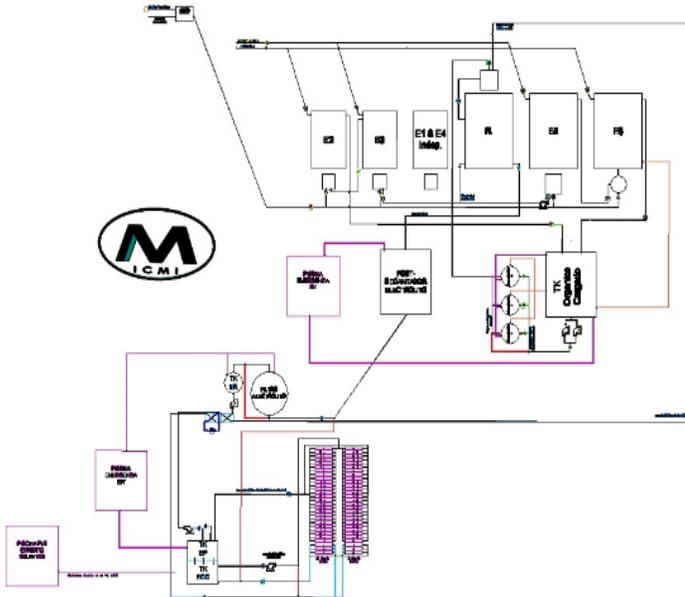
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





### 3.4 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

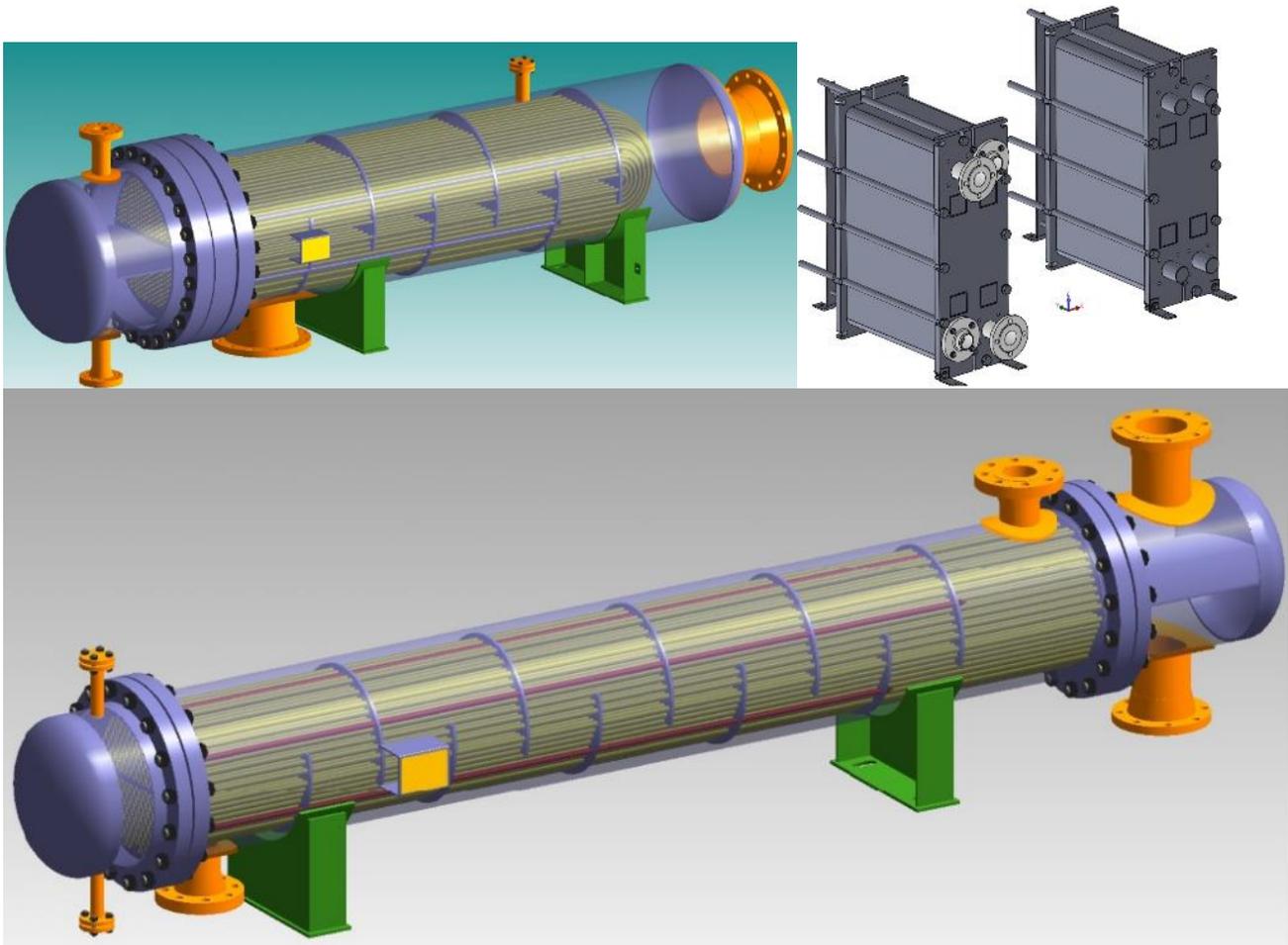
- Balances de masa
- Diagramas de flujo
- Dimensionamiento hidrometalúrgicos
- Dimensionamiento hidráulico





### 3.5 PROCESOS TERMICOS

- Dimensionamiento de intercambio de calor
- Transporte de fluidos térmicos
- Aislaciones habitacionales
- Aislación de tuberías
- Térmicos e intercambio de calor.
- Torres de enfriamiento
- Sistemas de refrigeración

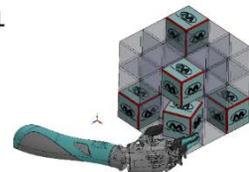


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



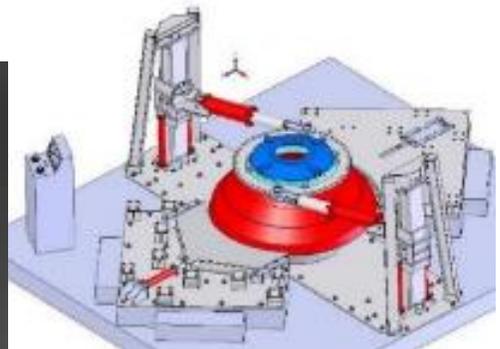
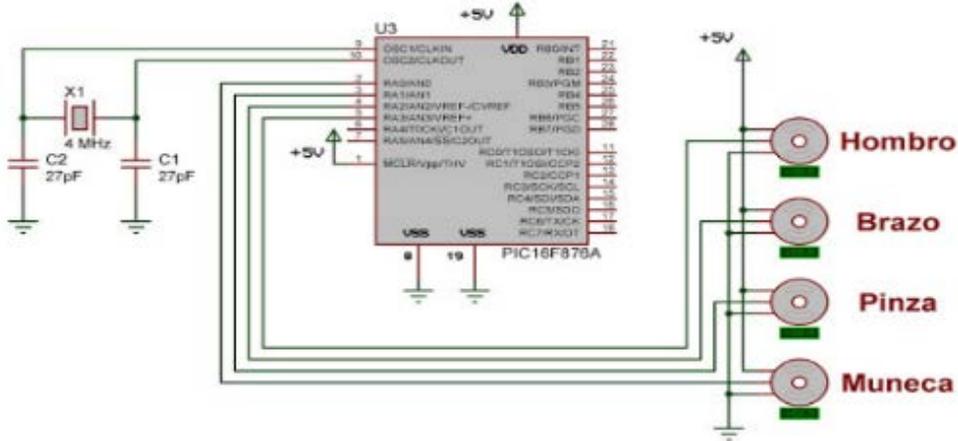
[www.maha.cl](http://www.maha.cl)

[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)

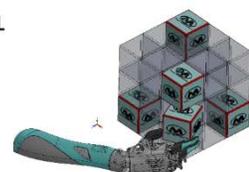


### 3.6 AUTOMATIZACION Y CONTROL – ROBOTIZACION DE PROC.

- Diseño de procesos robotizados
- Producción automatizada, instrumentación y control.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 4. MODELAMIENTO DE SISTEMAS – PROTOTIPOS DIGITALES 3D

### 4.1 SOFTWARE:

- CAESAR II – Analisis de Flexibilidad de tuberías.
- BENTLEY AUTOPIPE V8i - Análisis de Flexibilidad de tuberías.
- ANSYS – Análsis por elementos finitos (FEA). ANSYS WORKBENCH FLUENT / ADINA / SOLID WORKS.
- HEC-RAS - Análisis transporte hidráulico gravitacional.
- COSMOS WORKS - Análsis por elementos finitos (FEA)
- BENTLEY HAMMER V8i – Diseño de redes transporte de fluidos y protección redes de distribución de fluidos.
- CHUTE MAVEN - Análsis por elementos discretos (DEM).
- ROCKY DEM - Análsis por elementos discretos (DEM).
- EDEM Simulation - Análsis por elementos discretos (DEM).

### 4.2 CODIGOS Y NORMAS

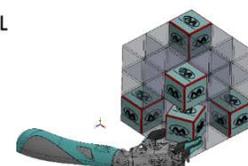
- ASME
- API
- ASTM
- MSS SP
- NEMA
- DNV

### 4.3 ANALISIS DE FLEXIBILIDAD DE TUBERIAS - FAP

El análisis de flexibilidad de tuberías consiste en determinar el comportamiento de una tubería sometidas a esfuerzos y deformaciones, debido a cargas estáticas y dinámicas del tipo inerciales (fuerzas debido al transporte fluido dinámico) y térmicas (por exposición o transmitidas desde el fluido). Los fluidos pueden ser transportador a muy altas temperaturas (Ejem: vapor sobrecalentado) o muy bajas temperaturas (Tem. Criogénica). De los análisis de flexibilidad se definen los estándares de soportes o sus diseños según el requerimiento de terreno, se definen sus sistemas de protección y de absorción de dilataciones térmicas. El análisis de flexibilidad, estático y dinámico, en tuberías considera factores de operación como la presión y temperatura, tiene por objetivo cuantificar los esfuerzos, fuerzas y momentos causados por la dilatación térmica, operación y el propio peso de la tubería. En el análisis los esfuerzos internos de la tubería o sistema son comparados con los esfuerzos máximos



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

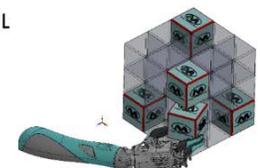
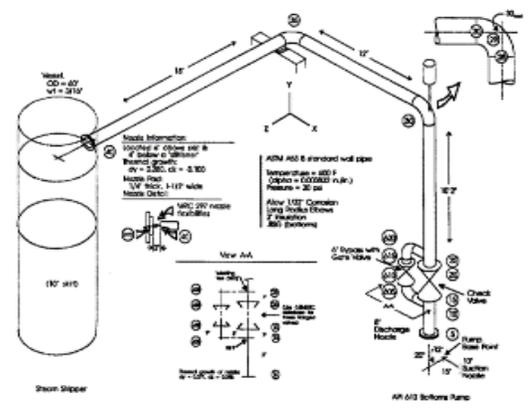
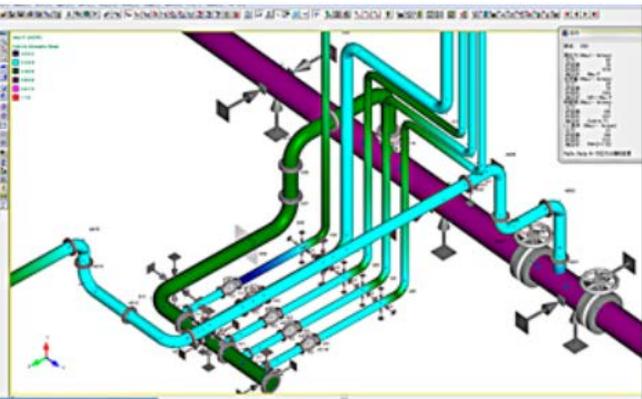
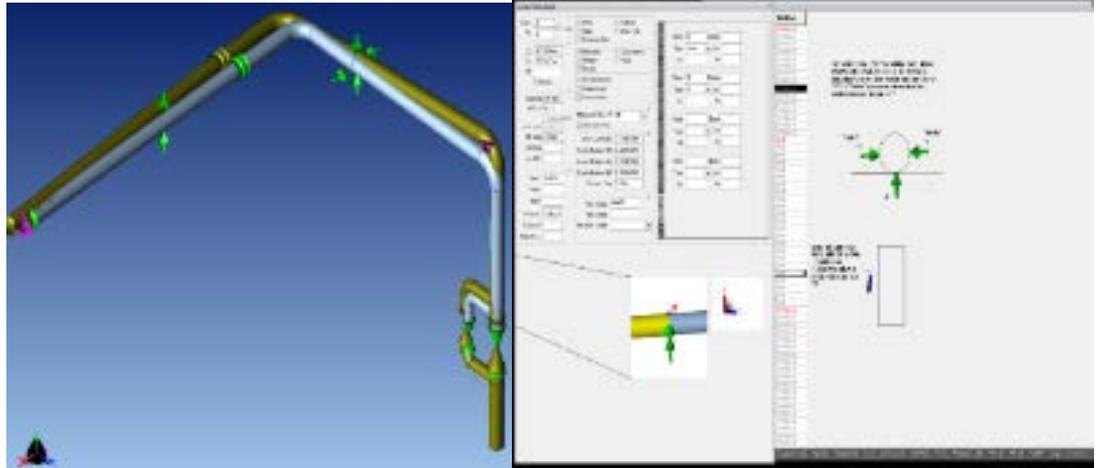


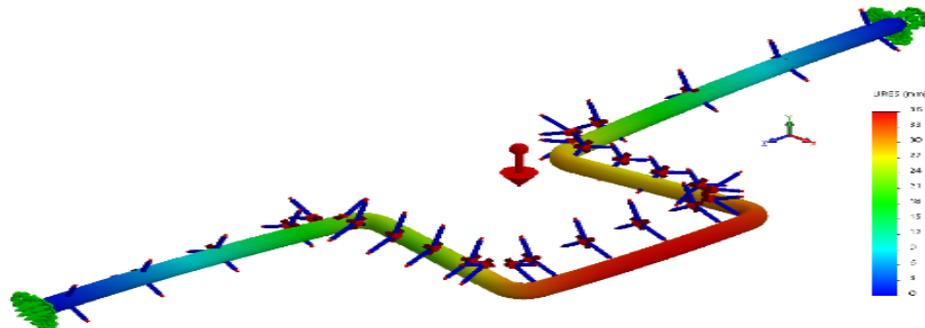
permitidos indicados en las normas, códigos y estándares, nacionales e internacionales. Estos esfuerzos, fuerzas y momentos generados son transmitidos a los equipos y soportes, por lo que son considerados en los cálculos correspondientes a los especialistas de las Disciplinas Civil y Mecánica que deben cumplir con la norma que rigen los equipos y estructuras. **En óptimas condiciones de operación, se asegura la infraestructura de la empresa, salvaguardar la integridad de las personas y se garantiza la preservación del medio ambiente.** Este tipo de análisis pueden y/o deben ser aplicados a los siguientes transportes y sistemas (según criterios de diseño o requerimientos por parte de operaciones).

- Líneas de tuberías de vapor (calientes).
- Líneas de nitrógeno (criogénicas).
- Cálculos de esfuerzos soportes para tuberías.
- Estaciones de bombeo y de válvulas.
- Sistema de venteo. Ductos.
- Análisis térmico (Gradientes de temperatura).

Para cubrir los estándares de seguridad y operación de los sistemas antes descritos se tendrá en consideración los siguientes factores (según corresponda al código que aplique al sistema) para ejecutar los análisis:

1. Las condiciones de presión y temperatura de diseño.
2. Las especificaciones del material.
3. El diámetro de tubería y el espesor de pared de cada componente del sistema.
4. El esquema del sistema (3D) incluyendo dimensiones y movimientos en cualquier punto.
5. Condiciones de borde. Limitaciones de reacciones finales en los puntos, tales como las establecidas por los fabricantes de equipos.





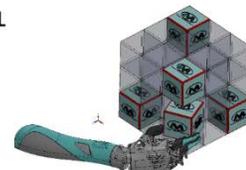
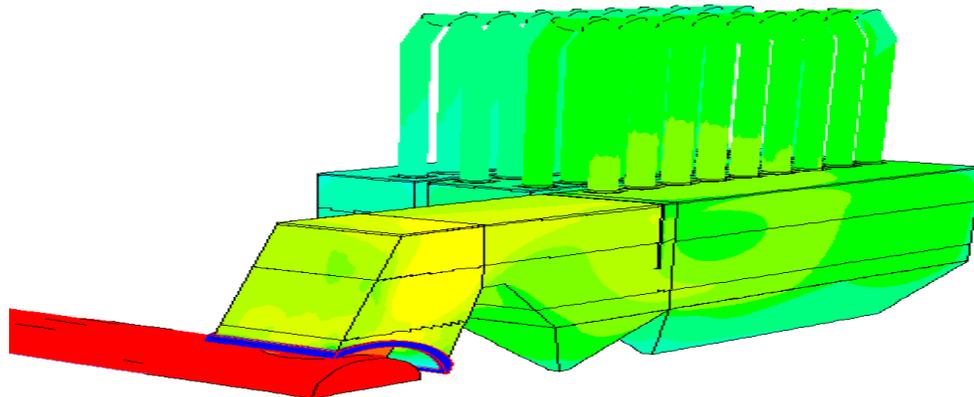
#### 4.4 ANALISIS FLUIDO DINAMICOS – CFD

Herramientas computacionales para el análisis numérico mediante FEA (Elementos Finitos) y CFD (Fluido dinámica) en aplicaciones practicas de proyectos.

- reacciones químicas, combustión y flujos turbulentos.
- transferencia de calor combinado y de radiación.
- flujos en régimen permanente.
- problemas de mezclado de multi-especies.
- flujos multifásicos.

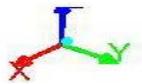
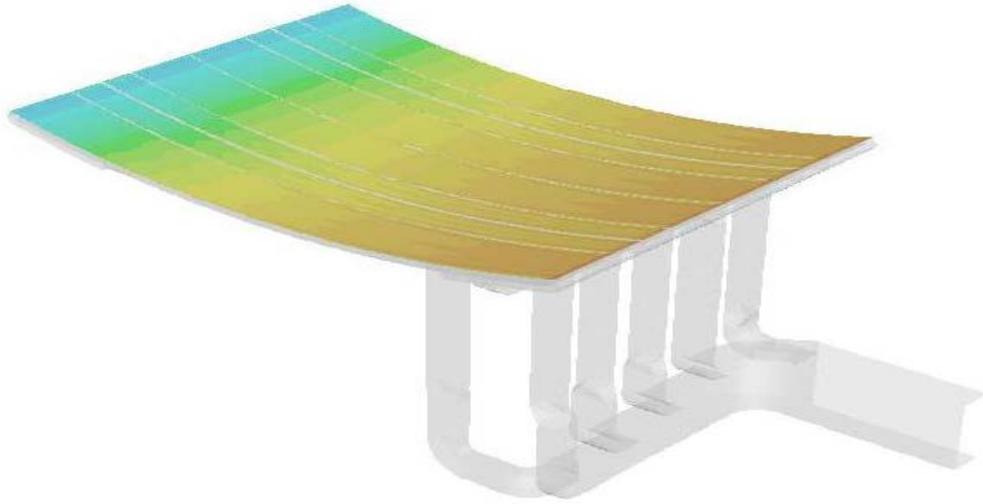
##### 4.4.1 APLICACIONES - CFD

- Horno Flash – Refrigeración Settler y Mezcla Aire Proceso /Oxigeno.
- Captación de gases en Campana Primaria con ductos radiantes.
- Simulación de Sistemas de Ventilación y Control de Polvo
- CFD de flujos, mezclas, estanques, hornos, etc.
- Distribución de temperatura en una cámara radiante

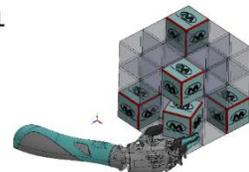
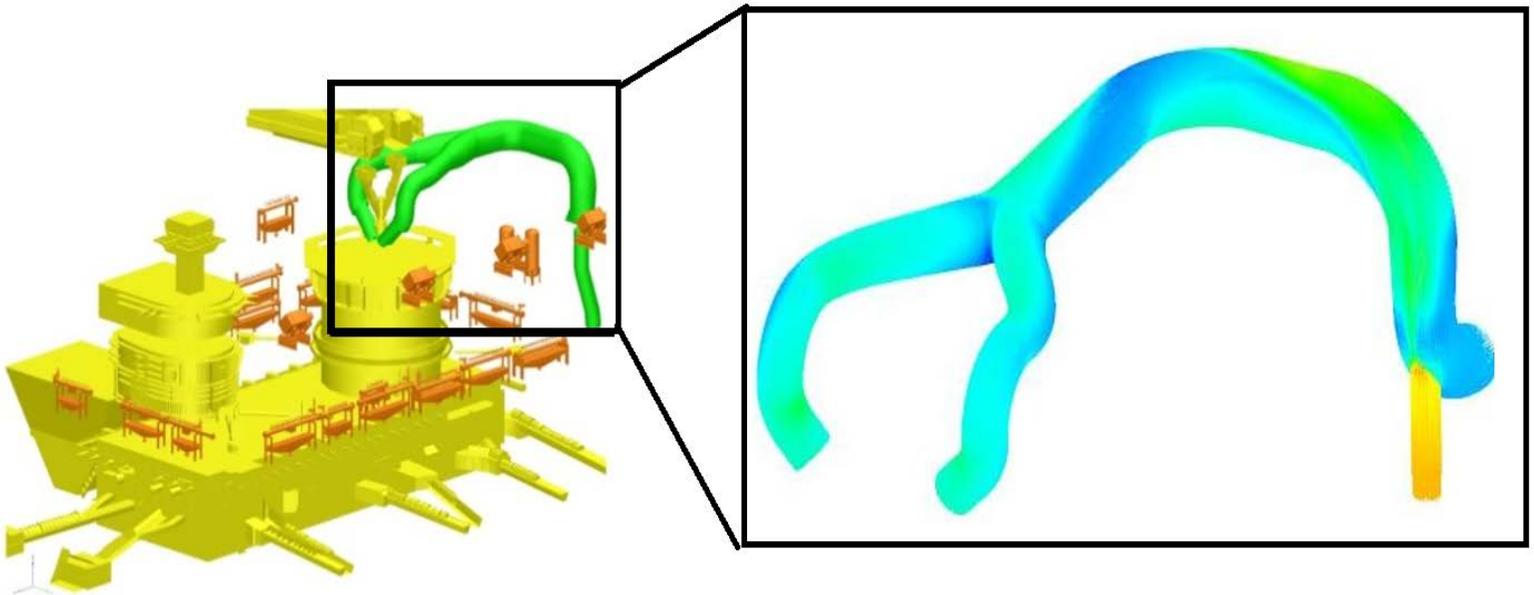




- Distribución de temperatura para la refrigeración del settler-horno flash.

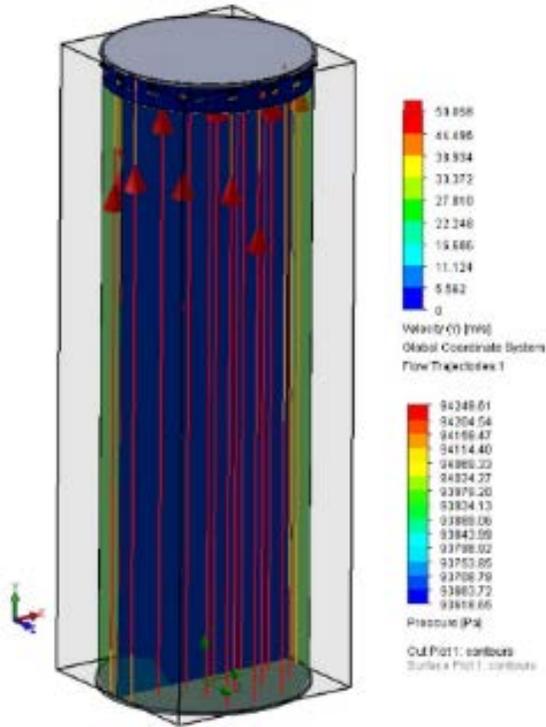


- Distribución de velocidades para Mezcla Aire Proceso /Oxigeno





- Análisis fluido dinámico chimenea - central termoeléctrica. Reporte de presiones focalizadas sobre la superficie interior del cilindro de la chimenea.

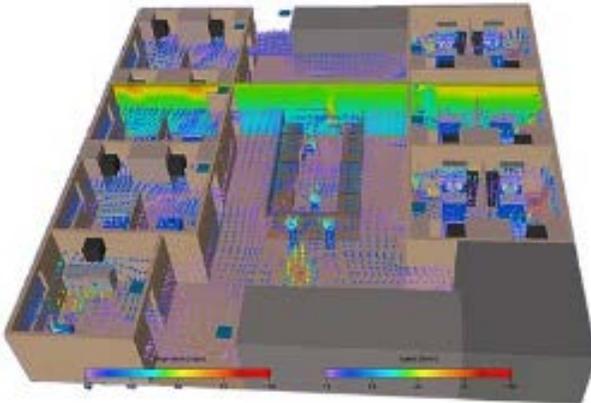


COLBUN S.A.

PROYECTO: REVISIÓN Y MEJORAS CHIMENEA  
TG-2 CENTRAL CANDELARIA



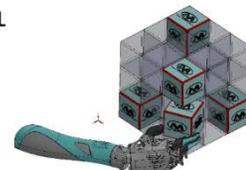
- Análisis fluido dinámico ventilación oficinas de ingeniería.

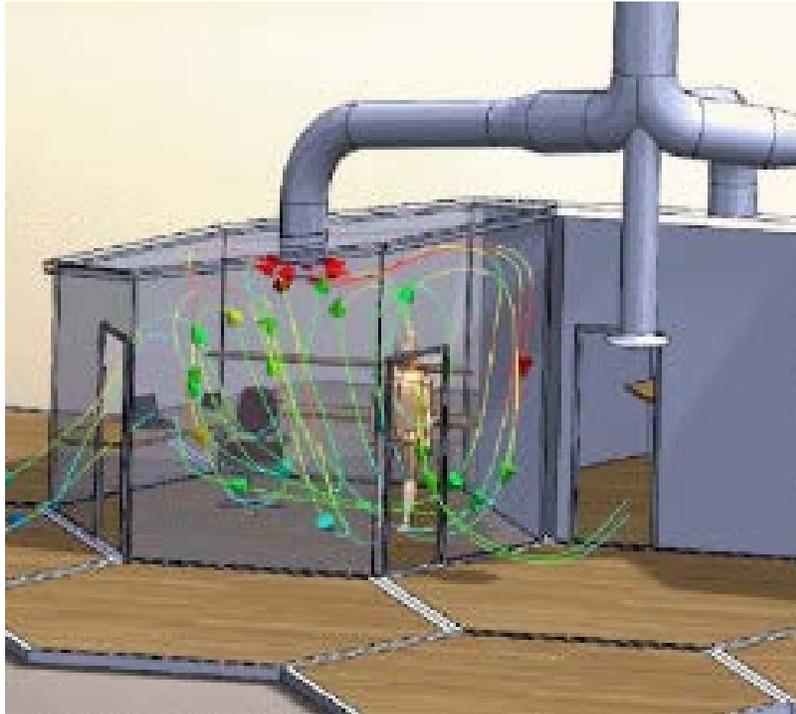


Proyecto enfocado en el estudio de la distribución óptima de equipo y muebles dentro de las instalaciones y oficinas con el objeto de garantizar la renovación del aire.

PROYECTO: DISTRIBUCION DE EQUIPOS SISTEMA DE VENTILACION

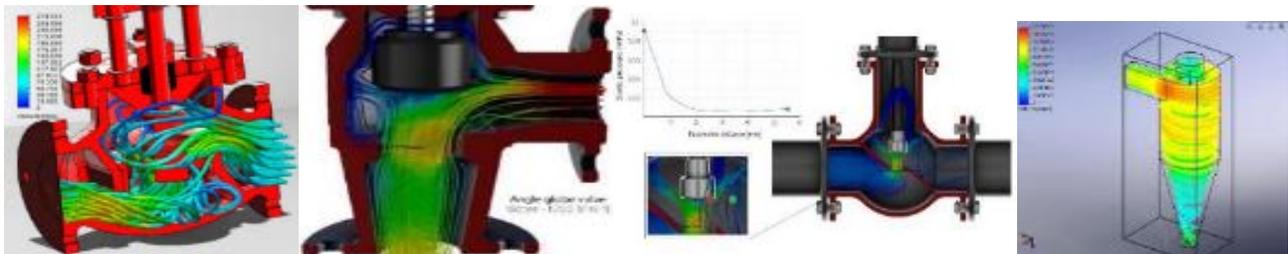
- Análisis fluido dinámico ventilación sala de máquinas y salas eléctricas.





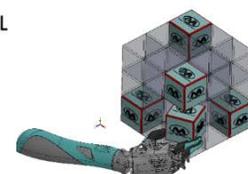
PROYECTO: DISTRIBUCION DE EQUIPOS SISTEMA DE VENTILACION.

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE DUCTOS DE VENTILACION.



#### 4.5 ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)

- Análisis de tensión & deformación incluyendo cargas mecánicas y térmicas
- Análisis sísmico según la norma chilena NCh 2369 of 2003.
- Análisis de fatiga por cargas cíclicas ya sea mecánicas o térmicas.
- Análisis termo mecánico de deformación prolongada y ruptura debido a fluctuaciones de temperatura.
- Análisis Fluido-Estructural.
- Verificación por medio de la norma ASME BPVC II División 1 , usando los criterios de diseño mediante el análisis que brinda la norma ASME BPVC Sección VIII División 2.





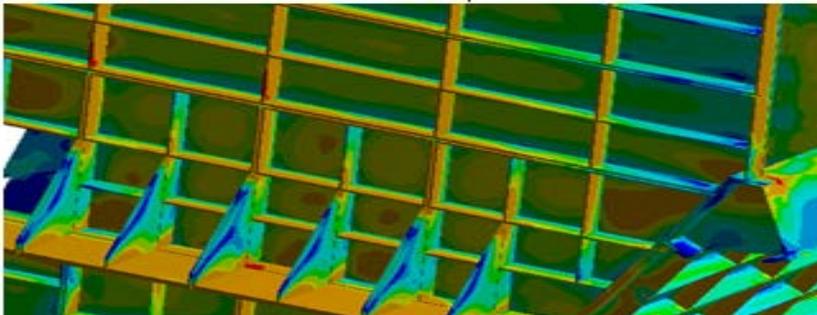
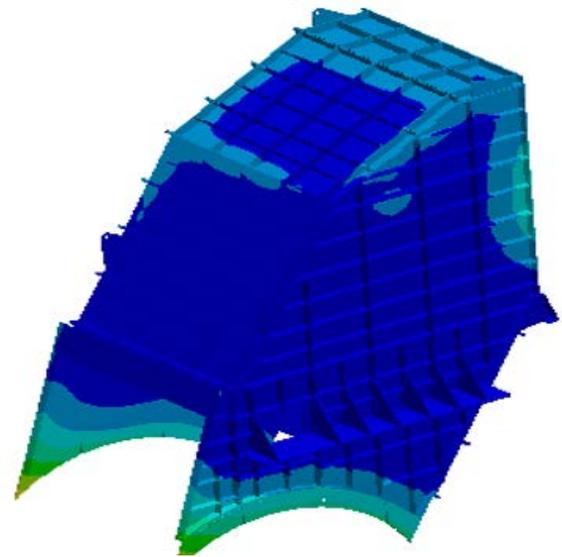
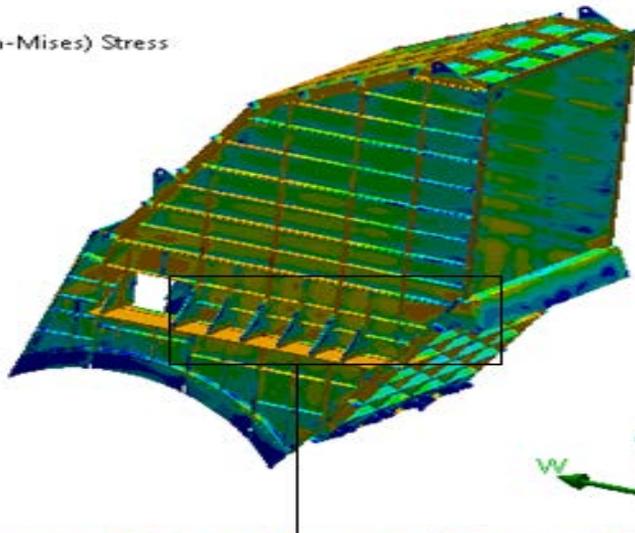
#### 4.5.1 APLICACIONES - FEA

- Estanques y tolvas.
- Tambores aglomeradores.
- Campanas para captura de gases.
- Servicios
- Análisis estructural de tambores aglomeradores, estanques y tolvas.
- Análisis termo estructural de campanas de captación de gases.
- Análisis estructural de elementos de soporte de equipos.
- Distribución de tensiones debido a cargas mecánicas en campana primaria Distribución de tensiones con carga térmica en campana primaria

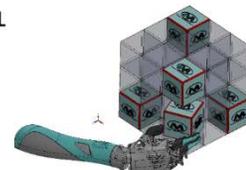
Plot of Equivalent Stress

Equivalent (von-Mises) Stress  
MPa

1317.3 Max  
.000  
15.05  
70.1  
25.14  
80.19  
35.24  
10.283  
5.33  
137638 Min



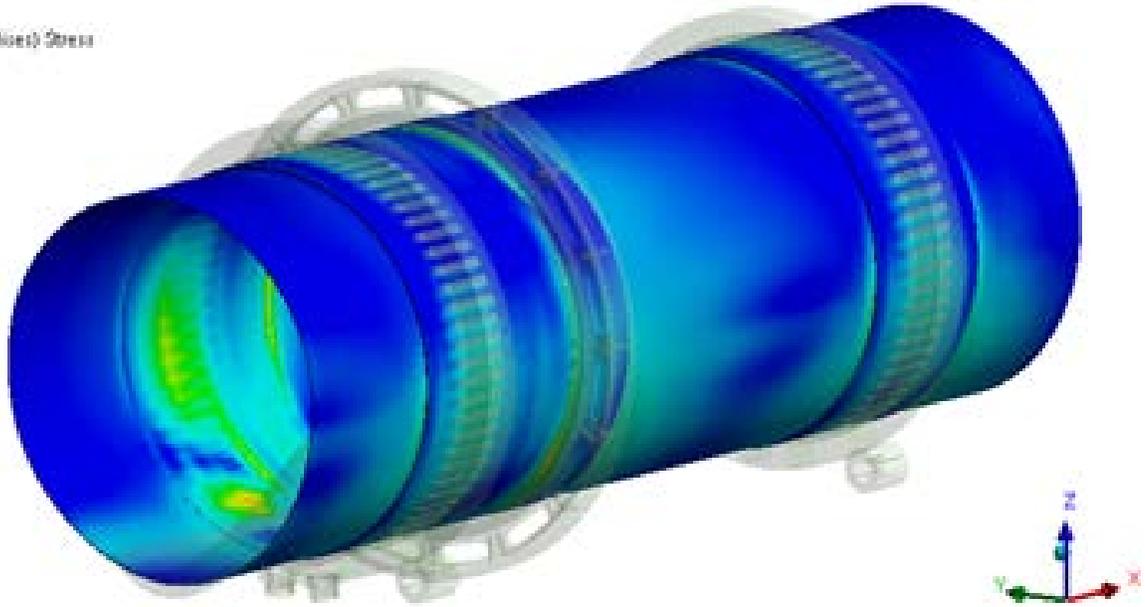
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



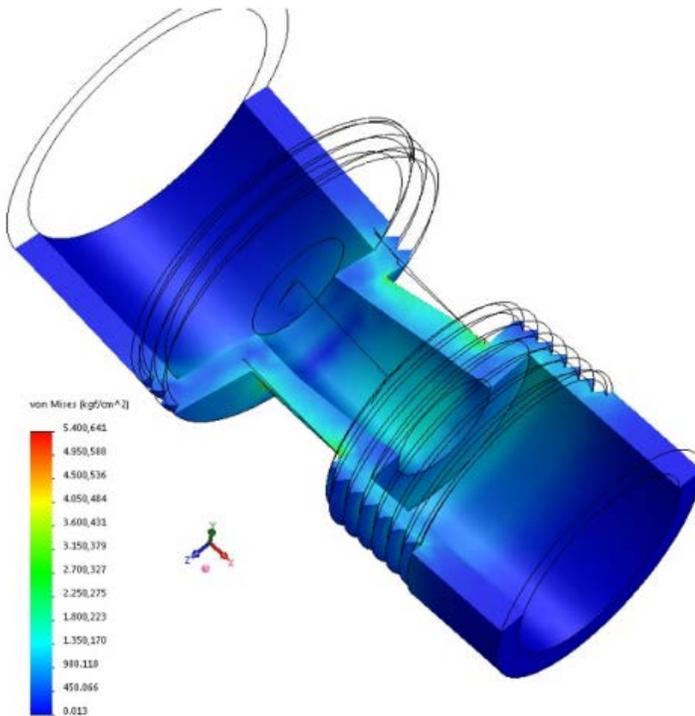


- Distribución de tensiones tambor aglomerador Sometido a cargas cíclicas

Modelo 3D



- Análisis por elementos finitos (FEA) resistencia mecánica y estructural de materiales.

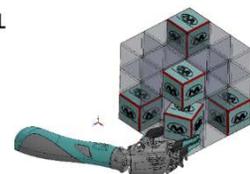


Proyecto: identifica de falla típica de montaje elementos de tubería.

Diseño y dimensionamiento de espesores.

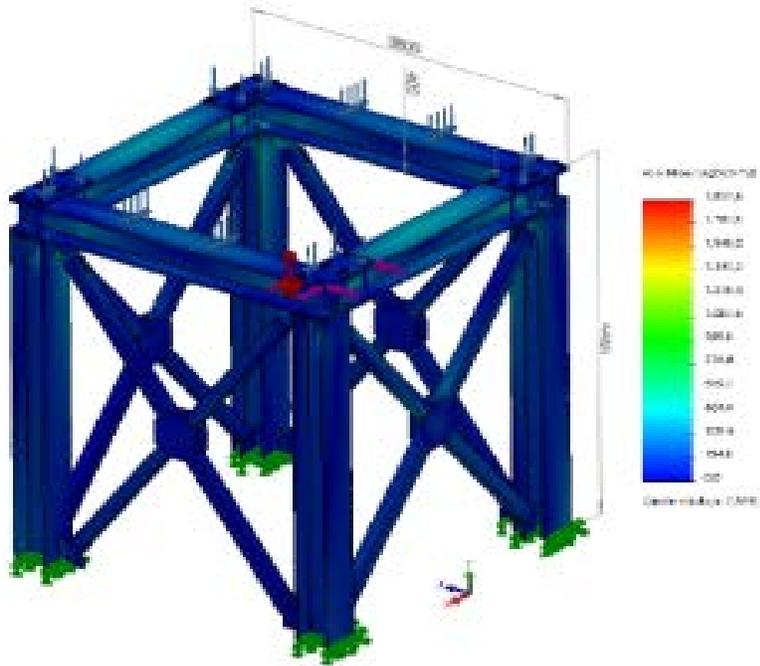


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





- Análisis por elementos finitos (FEA) resistencia mecánica y estructural de materiales.

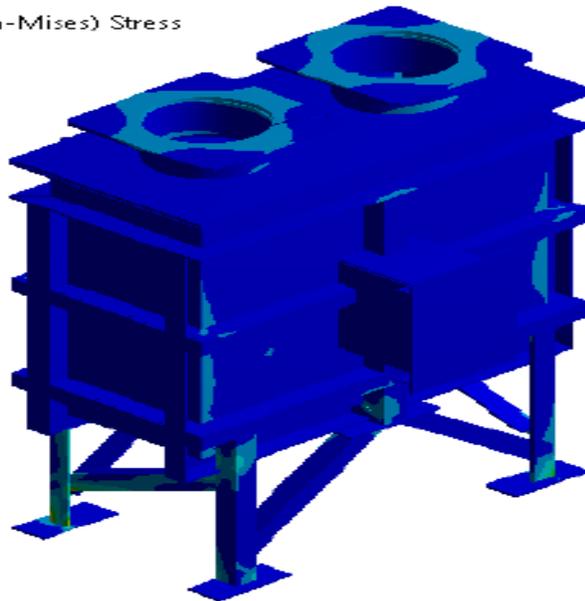


Proyecto: diseño de estructura base silo 50 ton

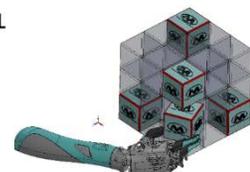
Espesores, pernos, placa base, silla de corte, fundaciones y OO.CC

- Distribución de tensiones para cajones contenedores de pulpa sometido a cargas hidrostáticas y sísmicas

von-Mises) Stress

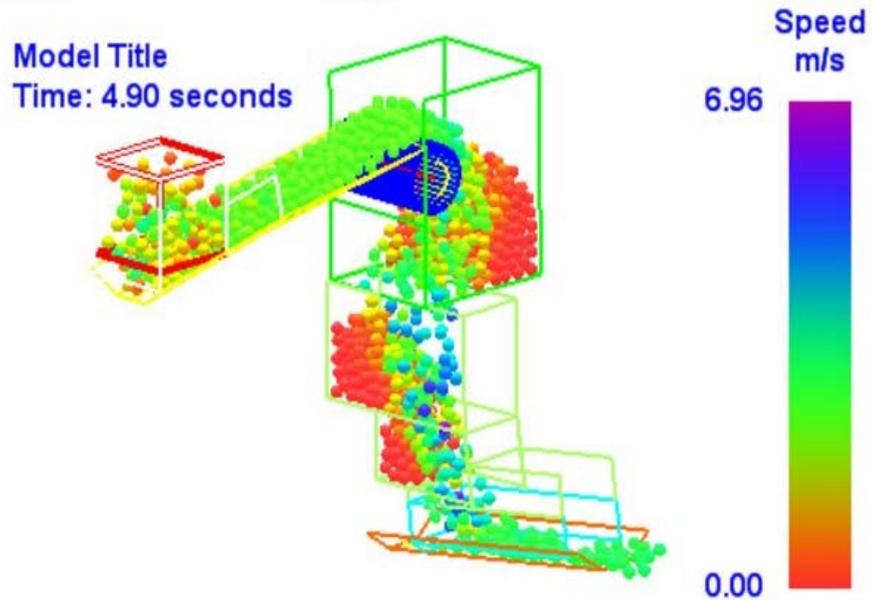


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

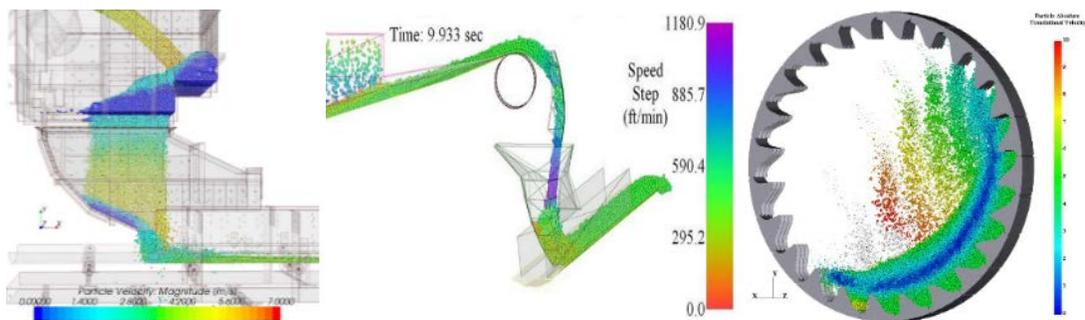


#### 4.6 ANALISIS POR ELEMENTOS DISCRETOS (DEA)

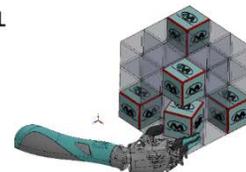
- Encuentre problemas en la etapa de diseño no cuando primero inicie los transportadores.
- Optimice el flujo de material.
- Minimizar el polvo y la degradación del material.
- Minimice la abrasión a la correa ya la tolva.
- Mantenga sus propias técnicas de diseño e ideas.

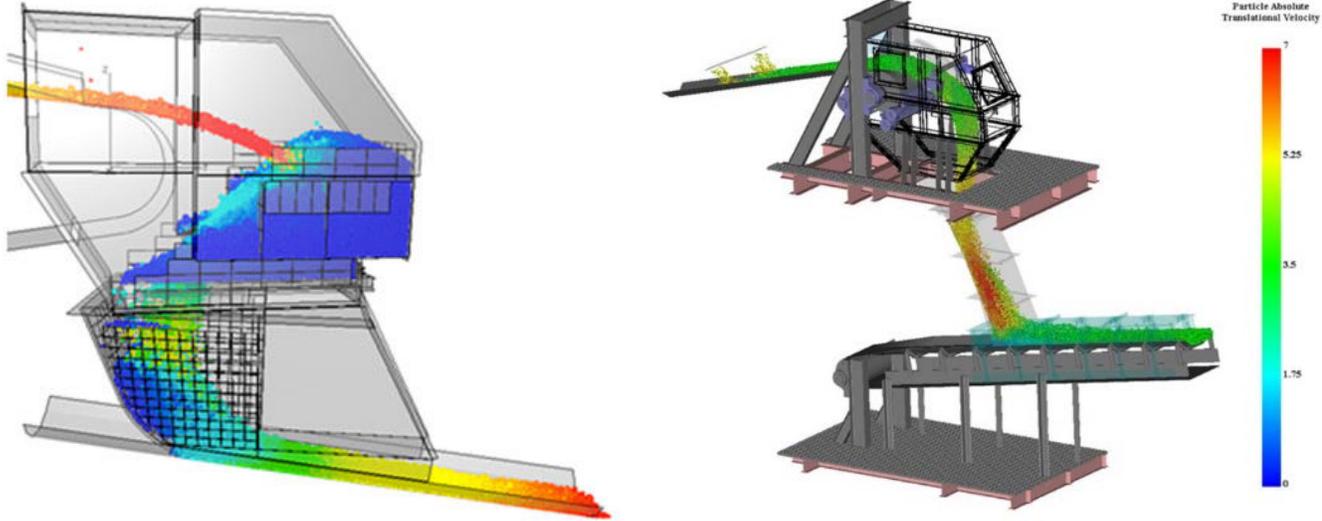


Diseño de traspaso y alimentaciones a correas transportadoras, harneros vibratorios, silos, apiladores, etc. Control y eliminación de atacamientos por humedad, recomendaciones para recubrimientos interiores de alto impacto y bajo desgastes.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



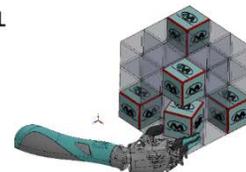


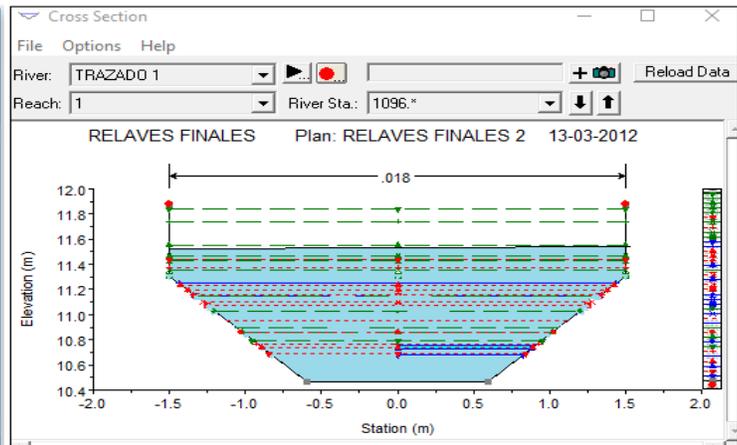
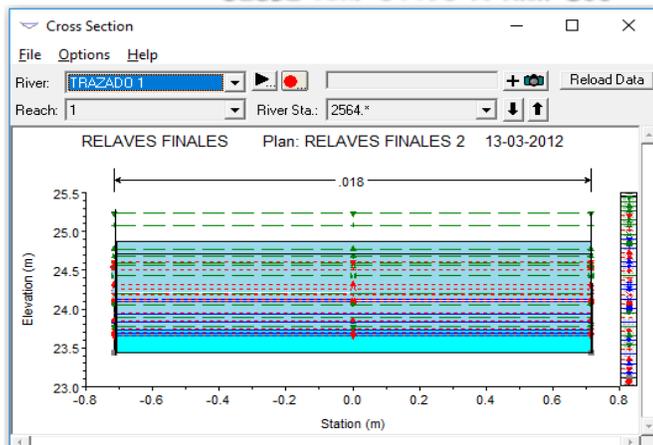
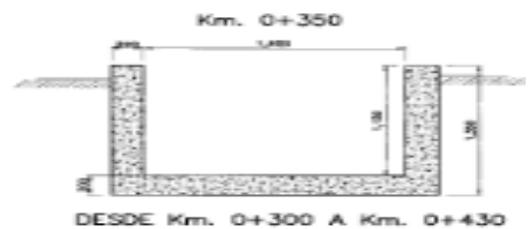
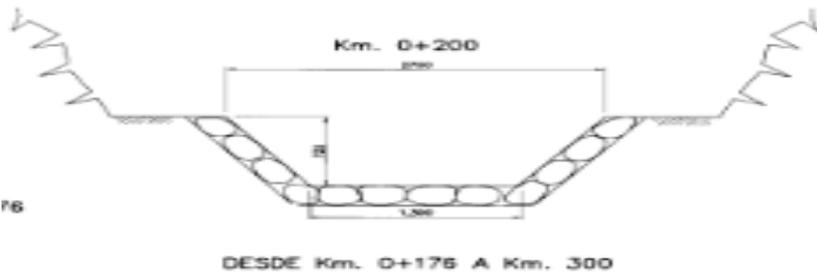
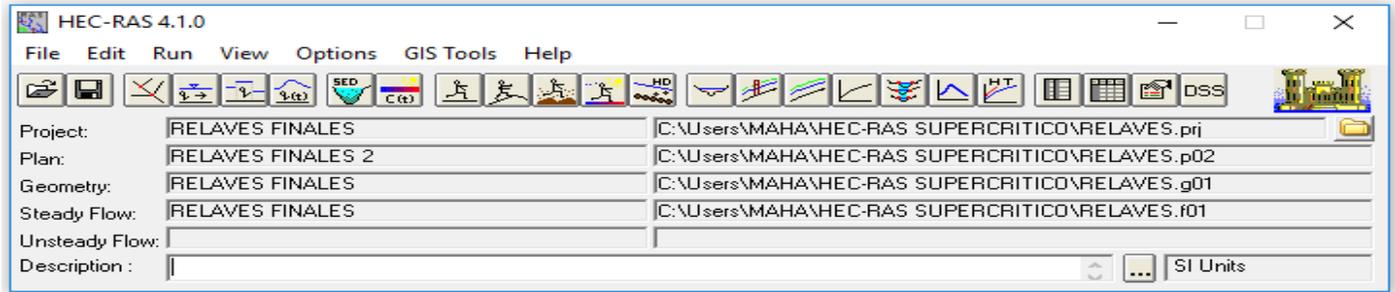
#### 4.7 ANALISIS HIDRAULICO TRANSPORTE GRAV. DE RELAVES



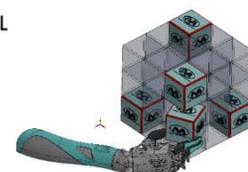
Proyecto: Peraltamiento (aumento altura de pared) de canaleta relaves finales. Nota: Relaves finales = Emisiones finales planta hacia tranques de relaves.

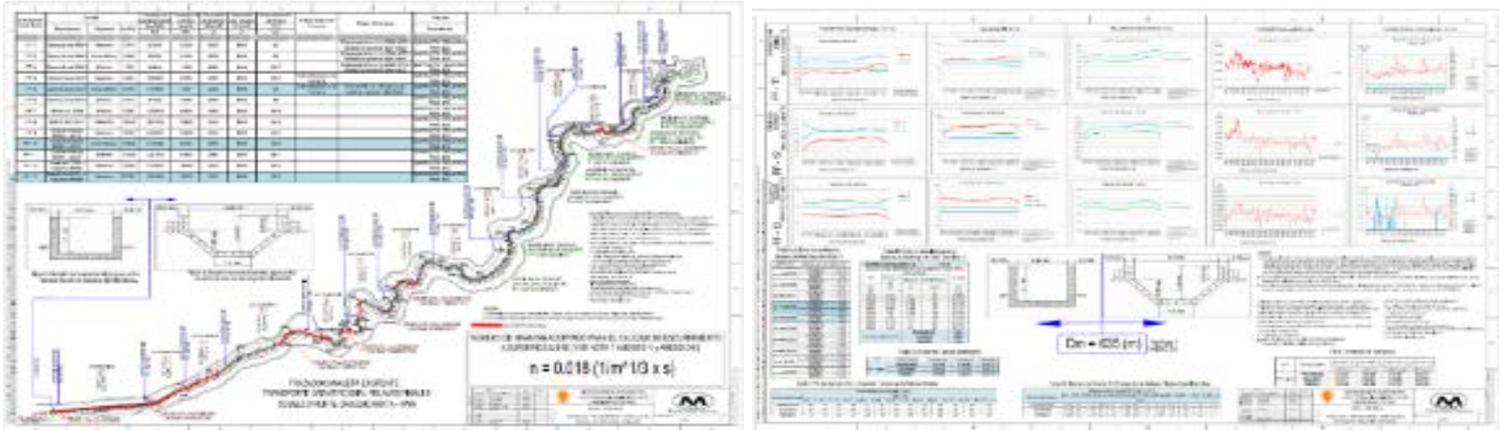
SOFTWARE: **HEC-RAS** Suma de emisiones finales de otra planta de la gran minería al transporte hidráulico gravitacional por canaleta, sección cuadrada y trapezoidal.





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 4.8 SIMULACIONES HIDROMETALURGICAS - LIX-SX-EW (LAB)

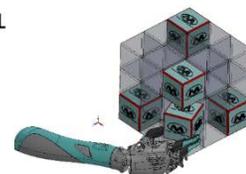
### 4.8.1 PLANTA PILOTO

MAHA ICMI diseña y fabrica esta Mini Plantas orientadas principalmente a la docencia, demostración de sistemas operacionales, entrenamiento de personal y algunos índices de procesos. La operación puede generar aproximaciones elaboradas en modelos teóricos y balances de masa. Como simuladores desagregan parámetros como:

- Estudio de la cantidad de etapas que pudiere demandar el proceso.
- Análisis de los contaminantes químicos de los extractantes.
- Análisis de los tiempos óptimos de mezclado.

### 4.8.2 PARAMETROS REPRESENTATIVOS

Los parámetros representativos de una simulación de procesos, otorgan factores del comportamiento químico de los componentes involucrados en la experiencia, los que relacionados con modelos analíticos proporcionan información para ajustes de diseño industrial. Las envergaduras de estos simuladores, están en función de las aplicaciones específicas, destacando entre ellas: Pruebas de Reactivos; Eficiencia de Intercambio; Análisis del Producto Final. Como aproximación óptima los valores de flujo en la solución de alimentación, debieran en lo posible situarse entre los 2 (gpm) a 12 (gpm). Se estiman modelos en rangos de soluciones de alimentación desde 100 (ml/min) a 2000 (ml/min), operando sobre tiempos de residencia, velocidades angulares del agitador, tipo de agitador, etc. En estos modelos se pueden inferir cambios en las velocidades, cambios de flujos, cambios en dirección de flujos, entre otros.



### 4.8.3 EQUIPOS

El grado de sofisticación de los equipos está circunscrito a las aplicaciones específicas solicitadas, pudiendo requerir desde el componente hasta una Planta Completa con alto grado de flexibilidad. Los sistemas de Electroobtención, tienen una dependencia lineal de la producción en las distintas etapas de concentración de las soluciones, equipados con elementos de control que actúan sobre la relación energía/área de las superficies expuestas al depósito catódico.





## 5. HIDRAULICA - PIPING



### Conducciones gravitacionales y en presión de fluidos (Diseño de piping, pipeline y canaletas), memorias de cálculo y criterios de diseño.

- Diseño de sistema de detección y combate de incendios.
- Pulpas y relaves de cobre, molibdeno y otros.
- Agua: potable, combate incendio, industrial, procesos, residuales, etc.
- Ácido sulfúrico.
- Aire comprimido y de soplado.
- Combustibles: petróleo diésel, kerosene y fuel oil.
- Oleoductos.
- Transporte de gas natural y licuado.
- Floculantes.
- Líneas de materias primas.
- Líneas de proceso y distribución.
- Orgánicos cargados-descargados, refinados, electrolitos (LIX-SX-EW)
- Ruteo de piping, listados, EETT, ingeniería.
- Inspección técnica de obras.
- Puesta en marcha.
- Diseño y construcción de equipos.
- Fabricación de spool y manifolds de cañerías en acero carbono, acero inoxidable, galvanizado, HDPE, DPE, FRP, PVC y PVDF.
- Emisarios Marinos.
- Obras Sanitarias.
- Sistemas de drenaje.

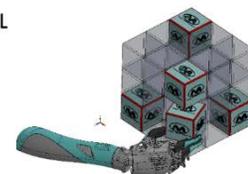


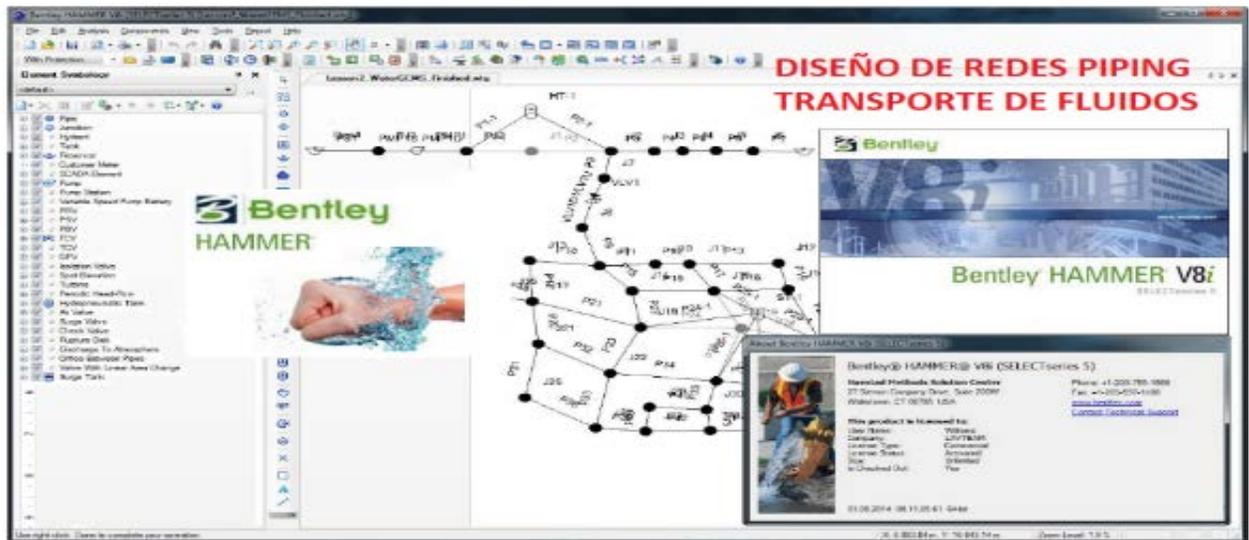
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



[www.maha.cl](http://www.maha.cl)

[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)





## 5.1 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE PIPING - PIPELINE

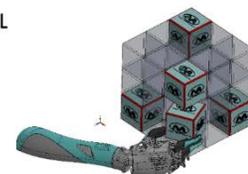
- Canales para conducción de relaves o pulpas.
- Tuberías de acero revestidas con poliuretano centrifugado o polietileno HDPE en baño fluidizado.
- Piping para equipos mecánicos y redes de distribución de agua y cualquier tipo de fluidos líquidos o gaseosos.
- Construcción de piping para procesos industriales e instalaciones.
- Ruteo de Piping para control de calidad (Inspección técnica).

### NOTA: SUMINISTRO DE SERVICIOS DE TERMOFUSION HDPE.

- Piping para equipos mecánicos y redes de distribución de agua y cualquier tipo de fluido líquido o gaseoso.
- Construcción de piping para procesos industriales e instalaciones.
- Ruteo de Piping para control de calidad (Inspección técnica).
- Redes de distribución agua incendio, procesos, pulpas, relaves, combustibles, lubricantes y fluidos en general.
- Diseño de Piping en acero, HDPE, PVC, CPVC, FRP, Cobre, etc.
- Requerimientos de diseño para la Eficiencia Energética en pos de la protección al medio ambiente.
- Conducción de Soluciones acidas.
- Emisarios Marinos.

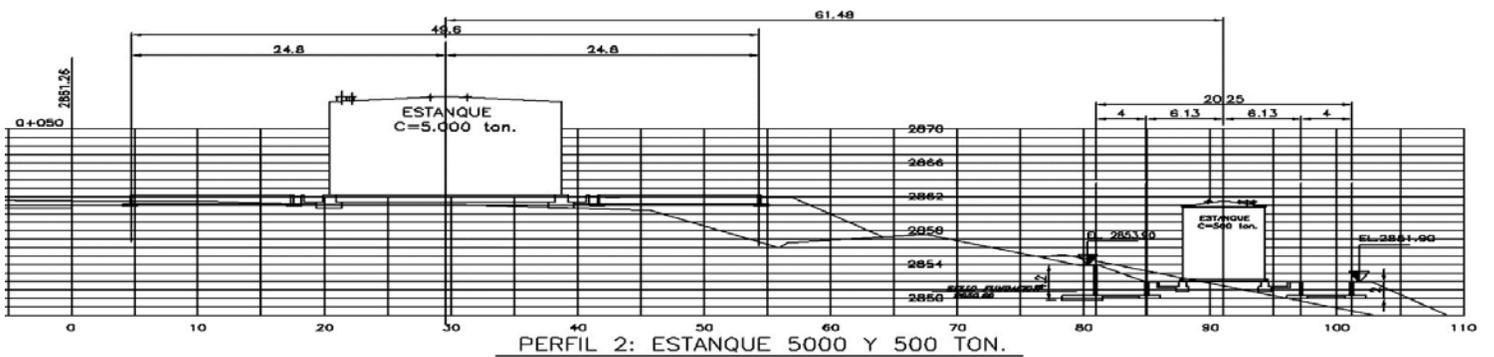
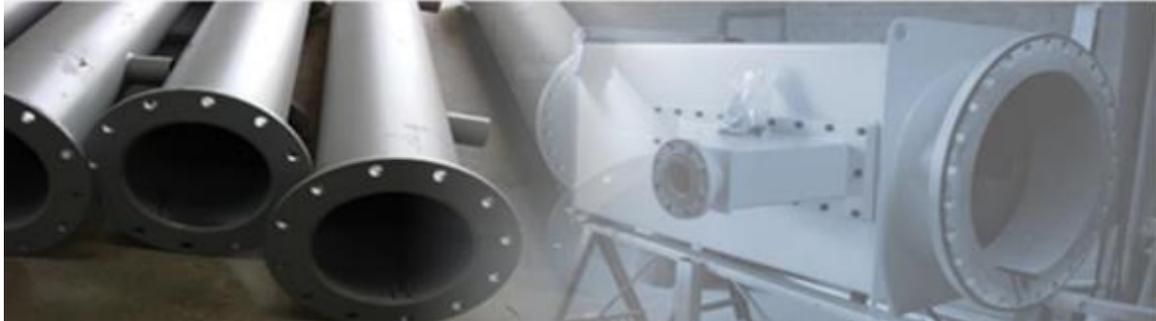


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

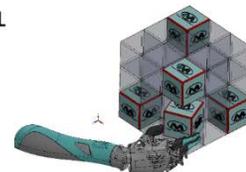


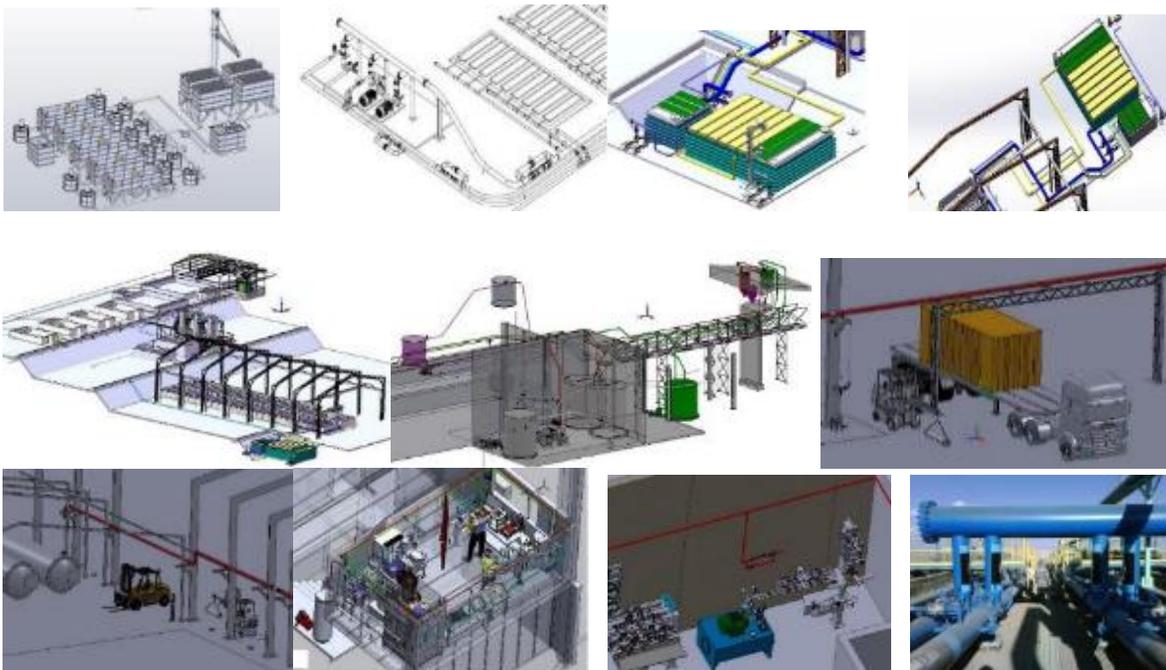


- Obras Sanitarias.
- Sistemas de drenaje.

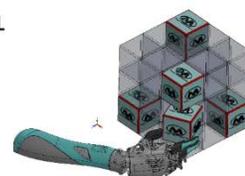


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



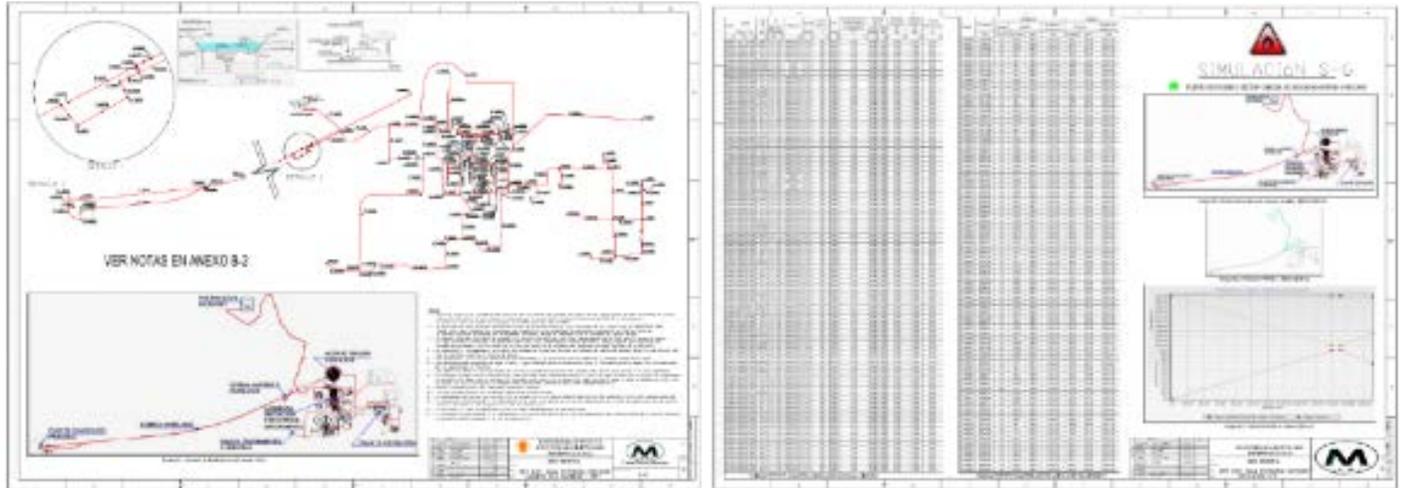


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 5.2 DISEÑOS REDES PARA EL COMBATE DE INCENDIO



El servicio de desarrollo de ingenierías para cada proyecto de protección contra incendios, documentos y planos necesarios para su posterior ejecución. La documentación desarrollada es:

- Criterios de diseño para los sistemas de detección y extinción de incendios
- Memorias de cálculo.
- Especificaciones técnicas de equipos y montaje.
- Estimación económica del los proyectos inversionales.

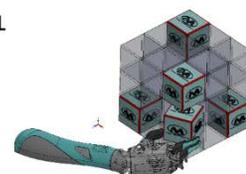
Tenemos competencias para desallorar proyectos integrales (EPC EPCM), esto es, Ingeniería, Suministro, Montaje, Comisionamiento y Puesta en Marcha de todos los sistemas implementados.

Todos los diseños siguen rigurosamente las normas y estándares nacionales e internacionales como:

- NCh
- NFPA
- D.S. 43 Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas de ministerio de salud.
- D.S. 160 Reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos. ministerio de economía, fomento y reconstrucción.

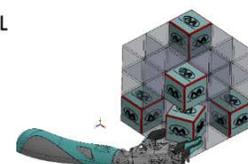
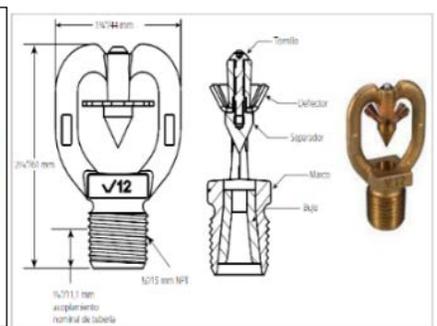
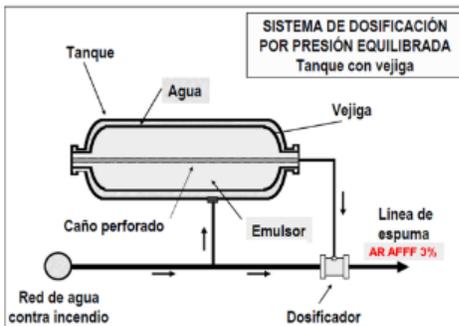
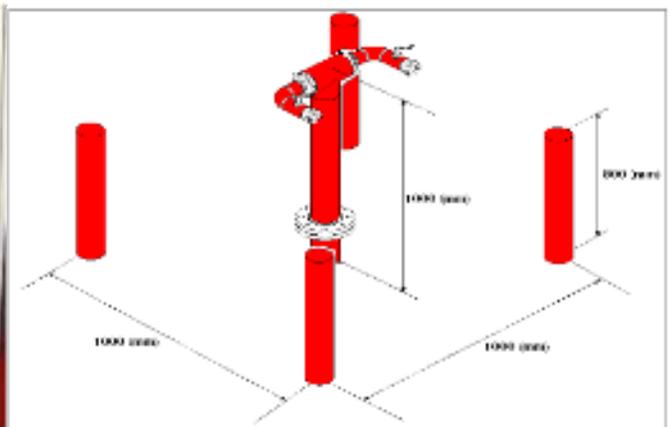


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



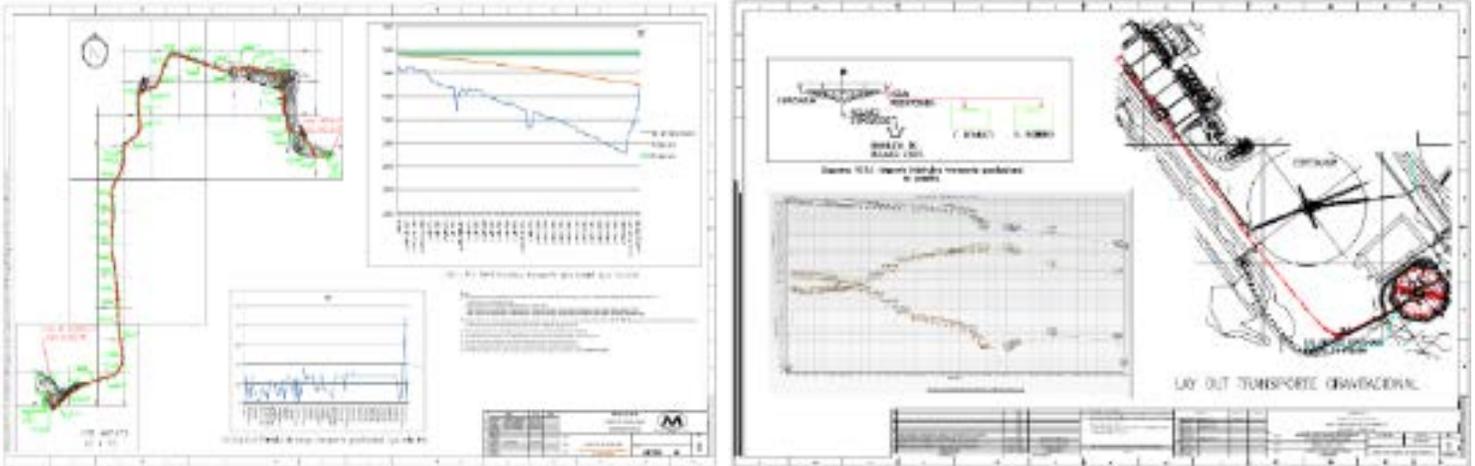


- D.S. 50 Reglamento de instalaciones domiciliarias de agua potable y alcantarillado (RIDAA) Titulo IV Red de Incendios. Ministerio Obras Públicas.

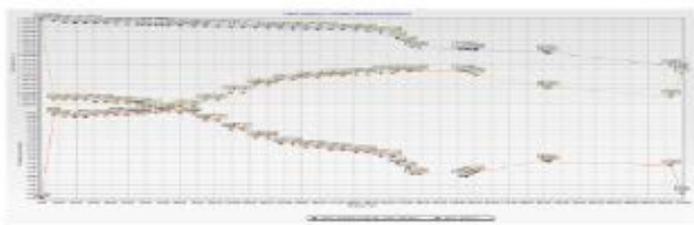
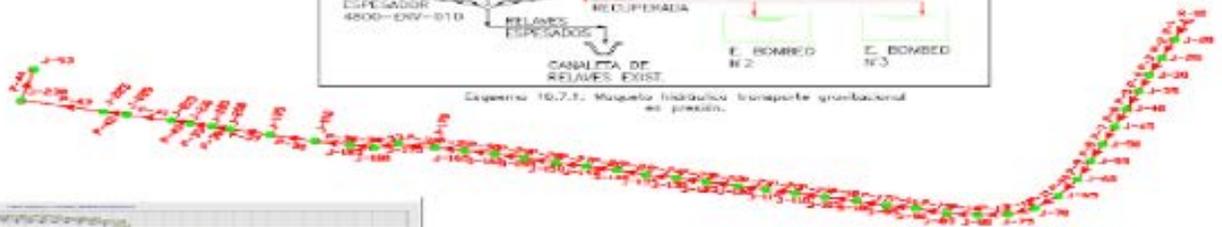
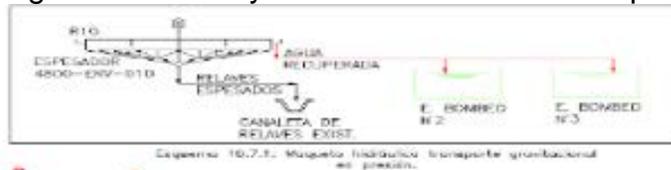




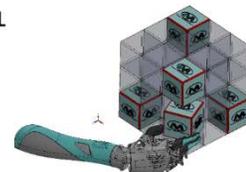
### 5.3 DISEÑO HIDRAULICOS REDES DE AGUA POTABLE E INDUSTRIALES

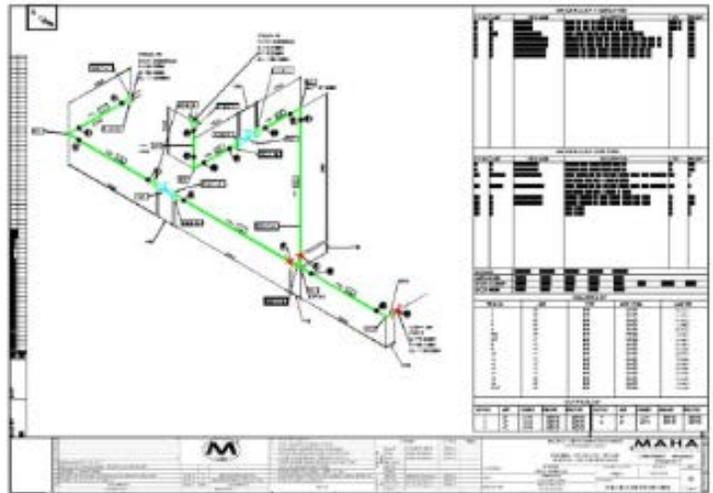
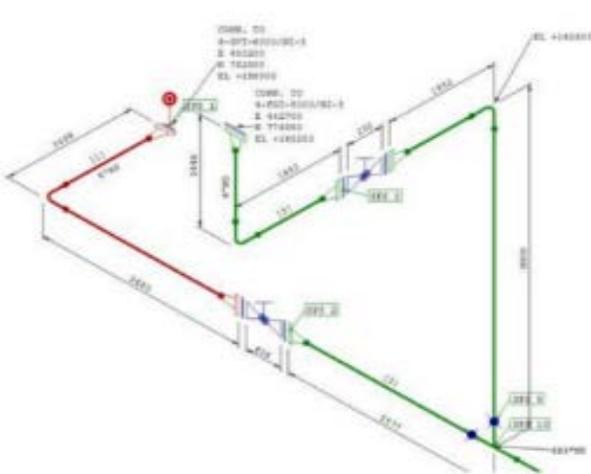
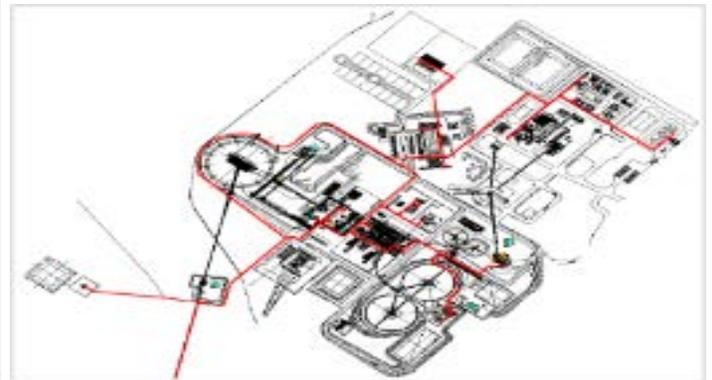
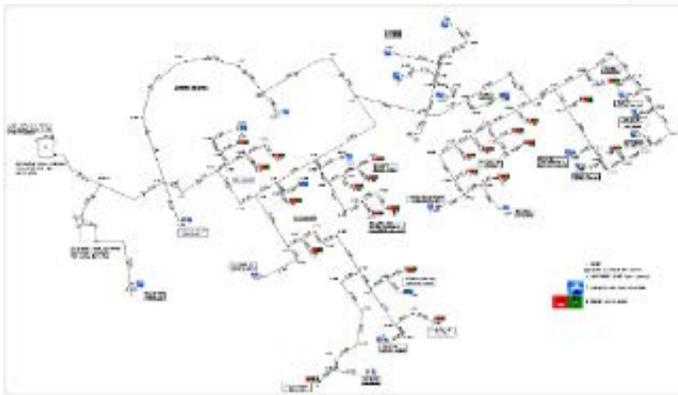
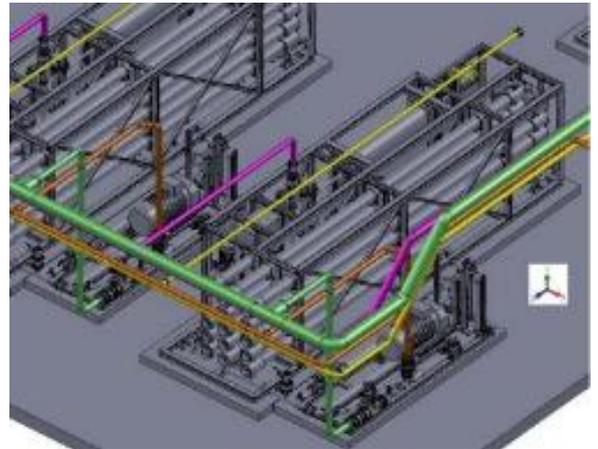
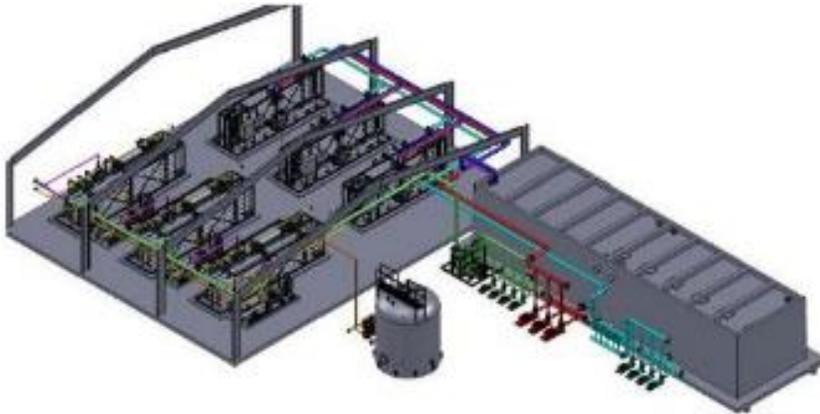


- Dimensionamientos del Sistemas de Distribución de los siguientes tipos de agua: Potable, industriales, procesos, residuales, regadío, subterráneas, etc.
- En el caso de las pérdidas singulares, se aplicará la formulación clásica que asocia la altura de velocidad con un coeficiente de resistencia a cada singularidad.
- Para la aducción se recomienda una velocidad de flujo máxima se fija en 3.0 m/s. Se evitar velocidades mayores a 3,5 m/s.
- Piping para el transporte y distribución de agua potable u otras.
- Todas las redes de distribución deben poseer sistemas de protección contra alzas de presión (golpes de ariete, hammer hidráulicos). Protecciones para evacuación de aire y depresiones por vaciado de línea.
- Sistemas de transportes gravitacionales y dimensionamiento estanques de cabeza.

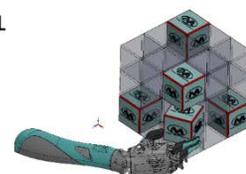


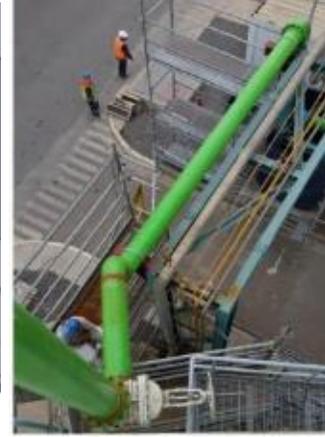
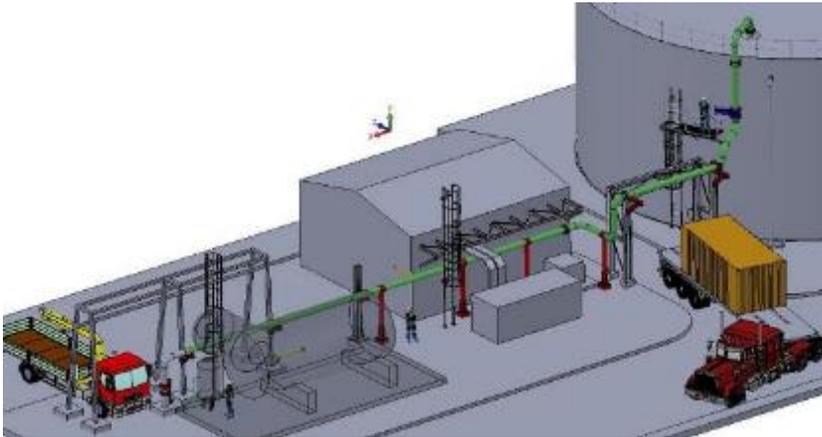
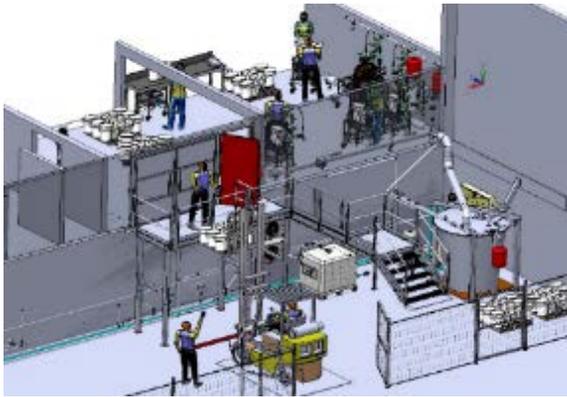
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



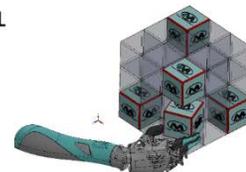


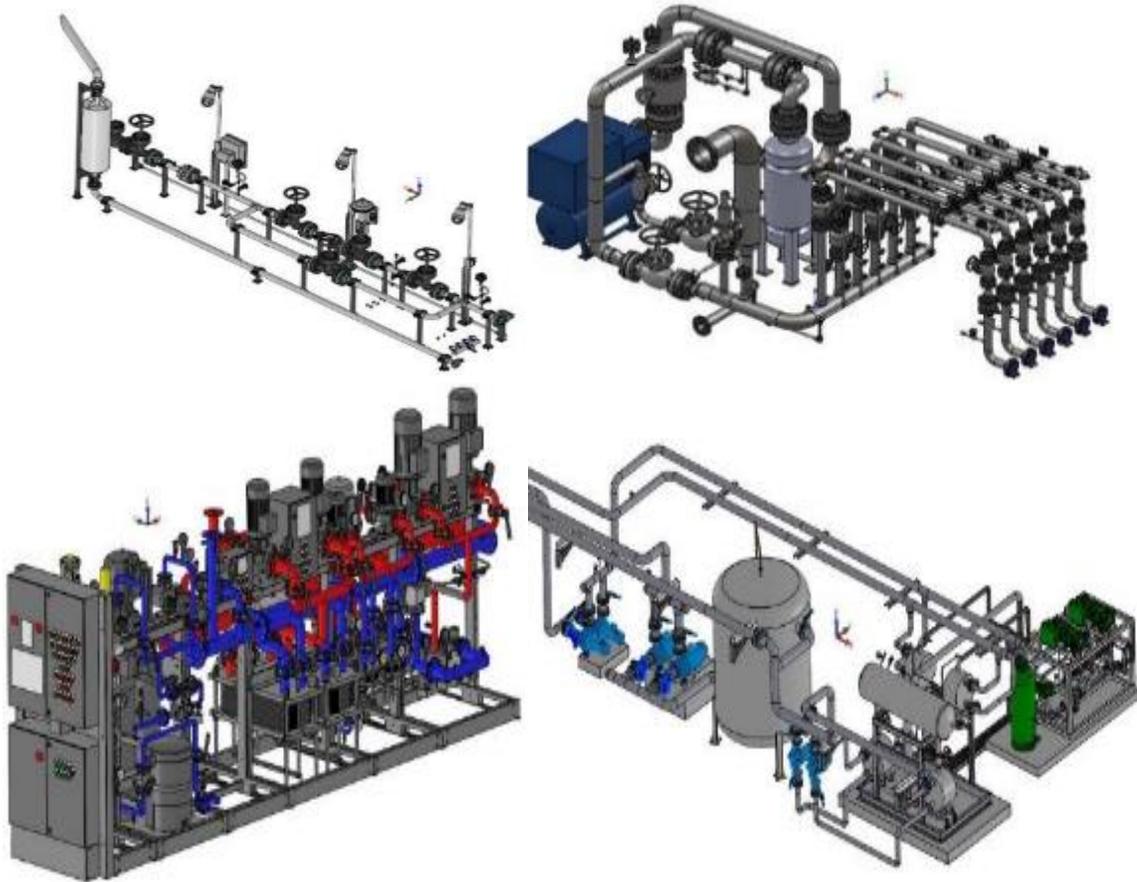
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



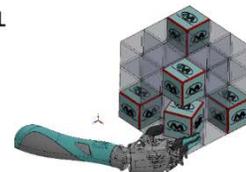


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





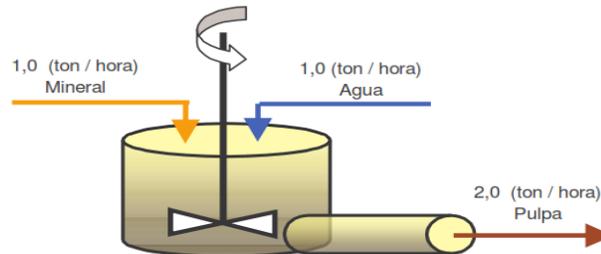
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



## 5.4 DISEÑO HIDRAULICOS - TRANSPORTE DE RELAVES Y PULPAS

### 5.4.1 CARACTERIZACION DE LAS PULPAS

Cuando se trabaja con pulpas (mezcla de mineral con agua), es necesario expresar la proporción relativa en que se encuentran el mineral y el agua.



#### 5.4.1.1 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN PESO (CP)

Corresponde al porcentaje que tiene el peso o flujo másico del mineral, respecto del peso o flujo másico de la pulpa, es decir:

$$C P = \frac{\text{Peso o Flujo Másico del Mineral}}{\text{Peso o Flujo Másico de la Pulpa}} \cdot 100 \quad (\%)$$

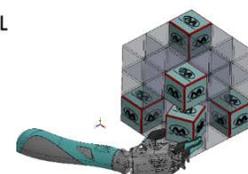
Dependiendo del tipo de operación metalúrgica, hay rangos de CP en los que se obtiene los mejores resultados.

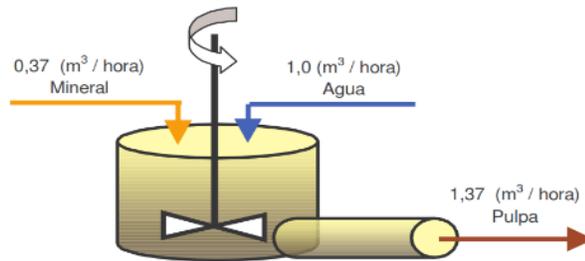
- Molienda convencional, es normal que la concentración de sólidos en peso sea del orden de 70 – 80 %.
- Flotación primaria, este rango es del orden de 30 – 35 %
- Flotación de limpieza de 25 a 30 %.

#### 5.4.1.2 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN VOLUMEN (CV)

Corresponde al porcentaje que tiene el volumen o flujo volumétrico del sólido, respecto del flujo o flujo volumétrico de la pulpa.

$$C V = \frac{\text{Peso o Flujo Volumétrico del Mineral}}{\text{Peso o Flujo Volumétrico de la Pulpa}} \cdot 100 \quad (\%)$$





En términos de CV, también hay rangos que entregan los mejores resultados, según sea el tipo de operación metalúrgica.

#### 5.4.1.3 DENSIDAD DE PULPA (DP)

Se define como la razón entre el peso o flujo másico de una pulpa, y su peso o flujo volumétrico.

$$D P = \frac{\text{Peso o Flujo Másico de Pulpa (ton / hora)}}{\text{Peso o Flujo Volumétrico de Pulpa (m³ / hora)}} \quad (\text{ton / m}^3)$$

La densidad de pulpa es probablemente el parámetro que se controla más frecuentemente en una planta, por lo sencillo que resulta determinarla al utilizar una Balanza Marcy. También en este caso se puede establecer rangos en los que se obtiene los mejores resultados según sea la operación metalúrgica.

#### 5.4.1.4 DILUCIÓN (DI)

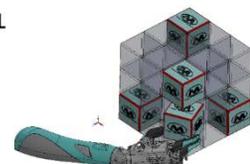
Se define como la razón entre el peso o flujo másico del agua, y el peso o flujo Másico del mineral.

$$D I = \frac{\text{Peso o Flujo Másico del Agua (ton / hora)}}{\text{Peso o Flujo Másico del Mineral (ton / hora)}} \quad (^\circ / 1)$$

#### 5.4.1.5 HUMEDAD (HU)

La definición de humedad se utiliza cuando en la pulpa la proporción de agua es pequeña, tal como ocurre, por ejemplo, con un mineral que llega a la planta, o un concentrado de planta después de una etapa de filtrado. Existen dos definiciones:

$$HU \text{ Base Húmeda} = \frac{\text{Peso Agua}}{\text{Peso Total}} \cdot 100 \quad (\%)$$





$$HU \text{ Base Seca} = \frac{\text{Peso Agua}}{\text{Peso Sólido}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Por su parte, la humedad en base seca es:

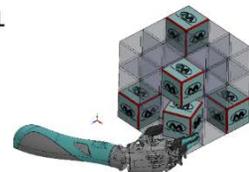
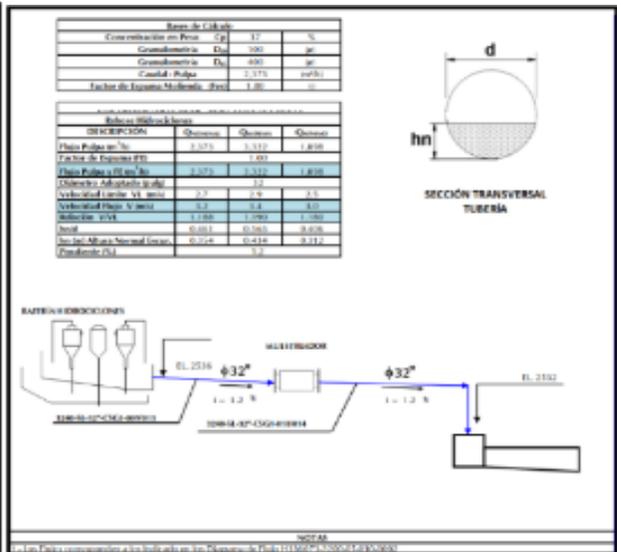
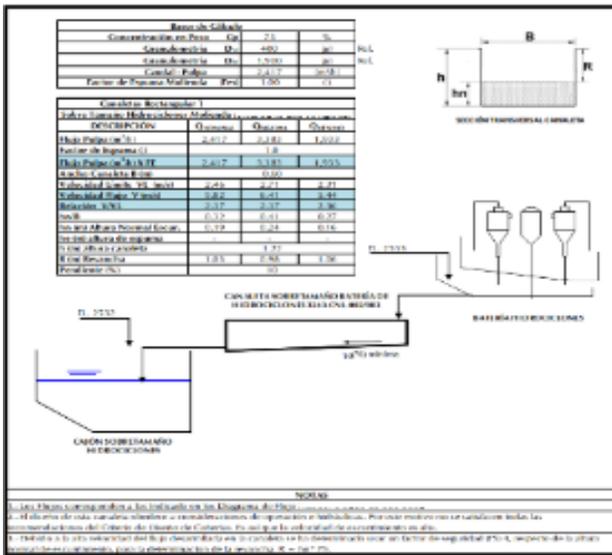
$$HU \text{ Base Seca} = \frac{1 \text{ ton}}{9 \text{ ton}} \cdot 100 = 11,1 \quad (\%)$$

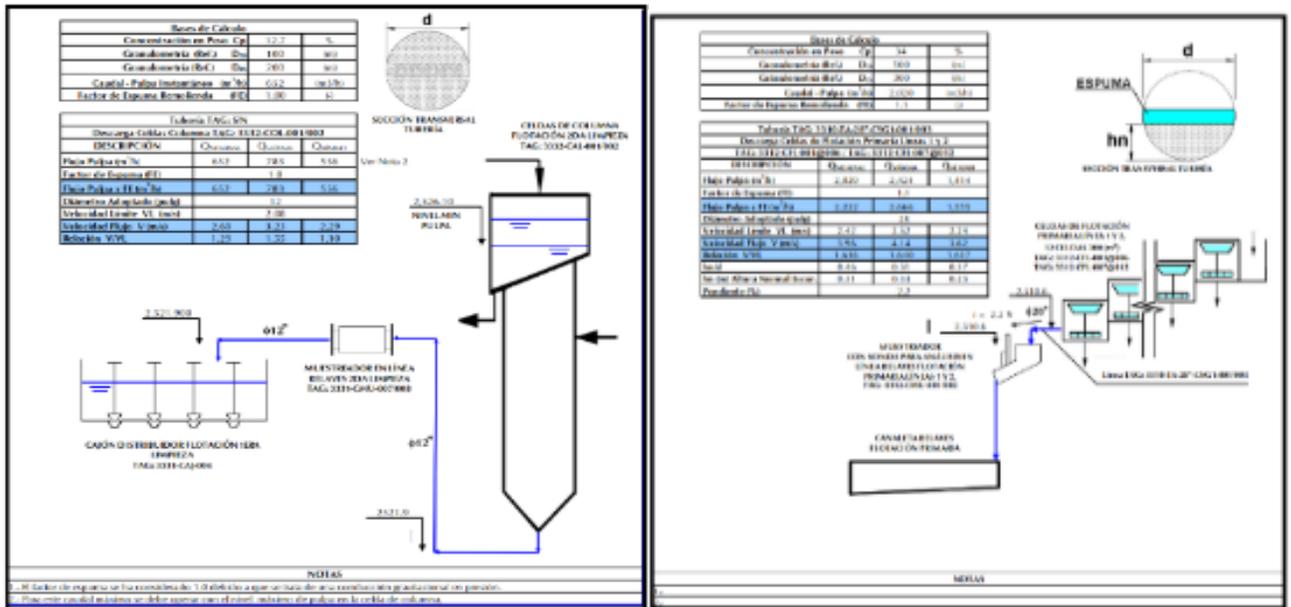
#### 5.4.1.6 TRANSPORTE HIDRAULICO

- Transportes gravitacionales y en presión por tubería y canaletas.
- Desarga y alimentación de equipos, cajones y piscinas.
- Dimensionamiento equipos de impulsión (Bombas de pulpa y relaves)
- Especificaciones técnicas de tuberías de transporte y revestimientos antidesgastes.
- Criterio de diseño para el transporte y almacenamiento.

#### 5.4.1.7 CANALETAS Y TUBERIAS TRANSPORTE GRAVITACIONAL

- Inclinaciones según criterio de diseño.
- Aumento de diámetro de tubería o revancha en canaletas cuadradas o trapezoidales por curvas en el trayecto o espesores de espuma en pulpas espumosas.





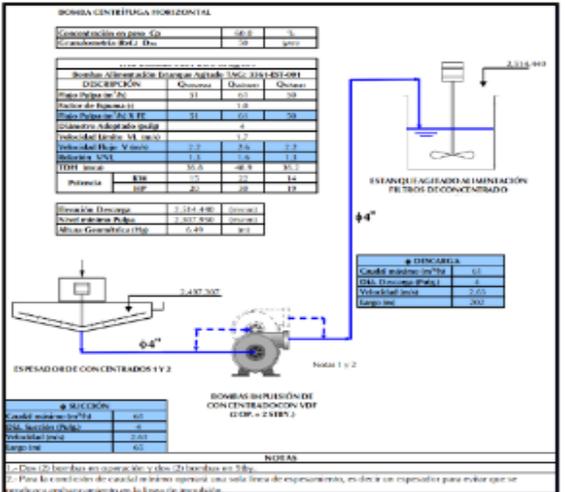
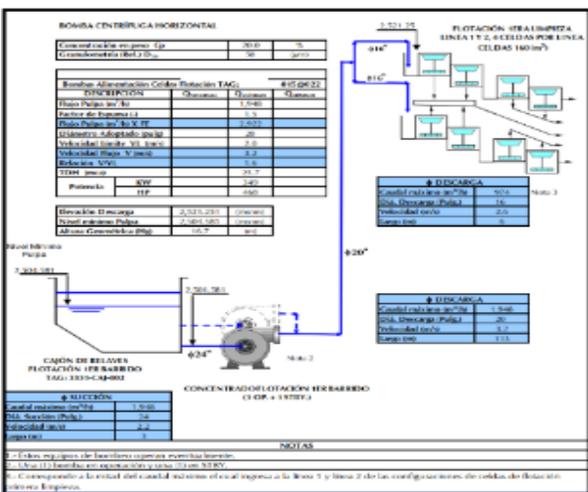
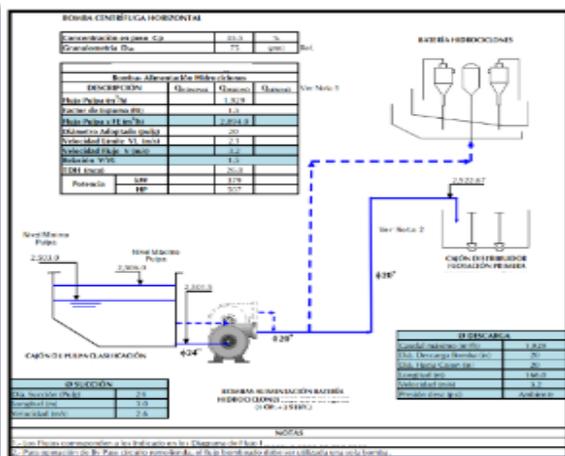
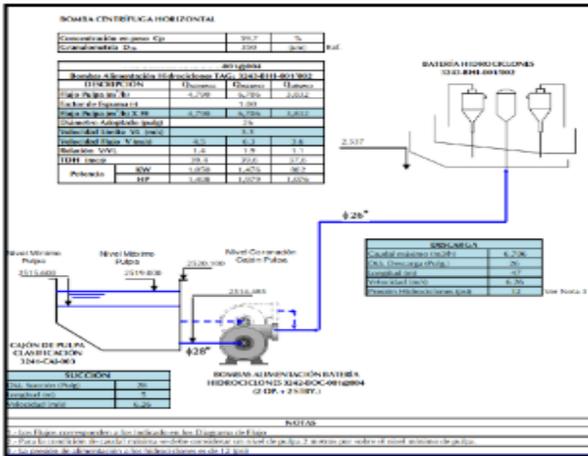
**5.4.1.8 TRANSPORTE EN PRESION – BOMBAS**

- Transportes en presión por tubería.
- Diseño de descarga y alimentación de equipos, cajones y piscinas.
- Dimensionamiento equipos de impulsión (Bombas de pulpa y relaves)
- Diseño de cajones de bombeo.
- Especificaciones técnicas de tuberías de transporte y revestimientos antidesgastes.
- Criterios de diseño para el transporte y almacenamiento.

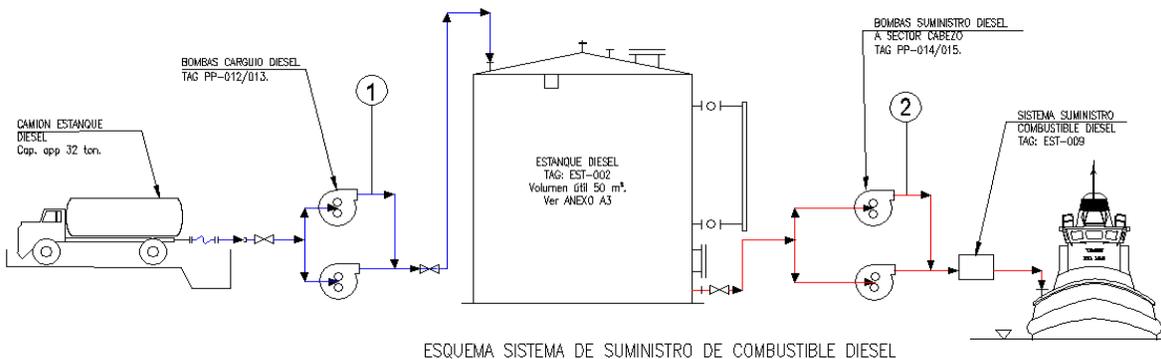


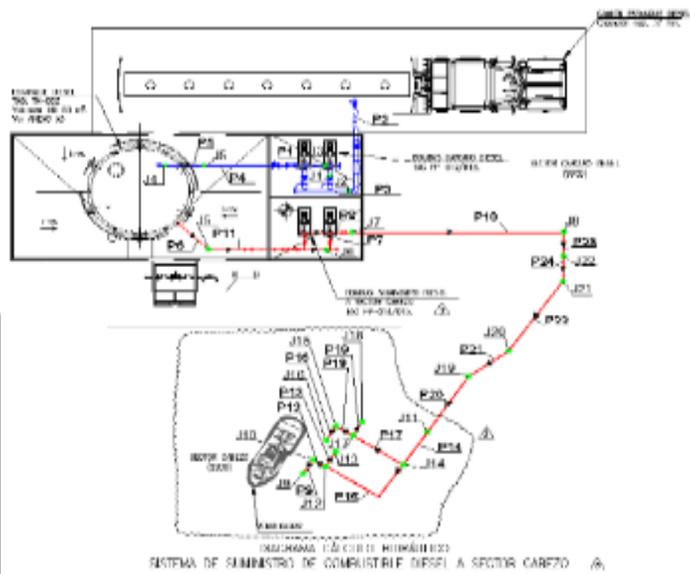
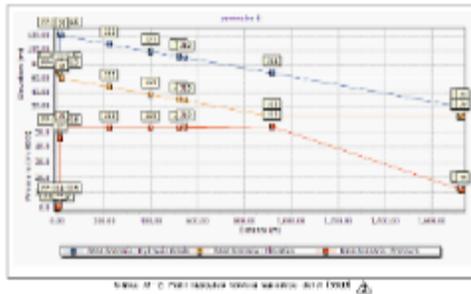
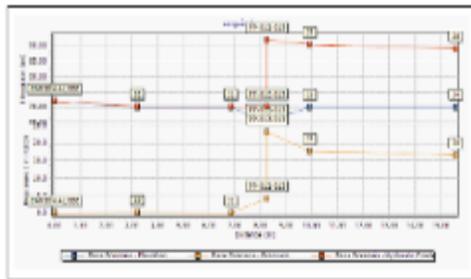
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

[www.maha.cl](http://www.maha.cl)  
[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)

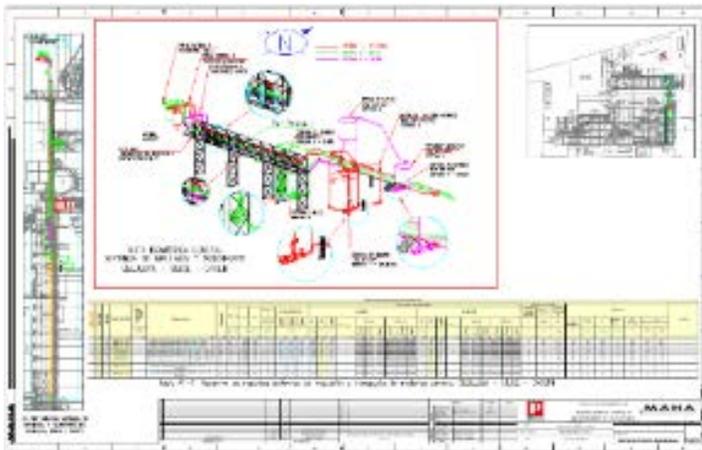


## 5.5 TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES

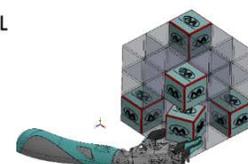


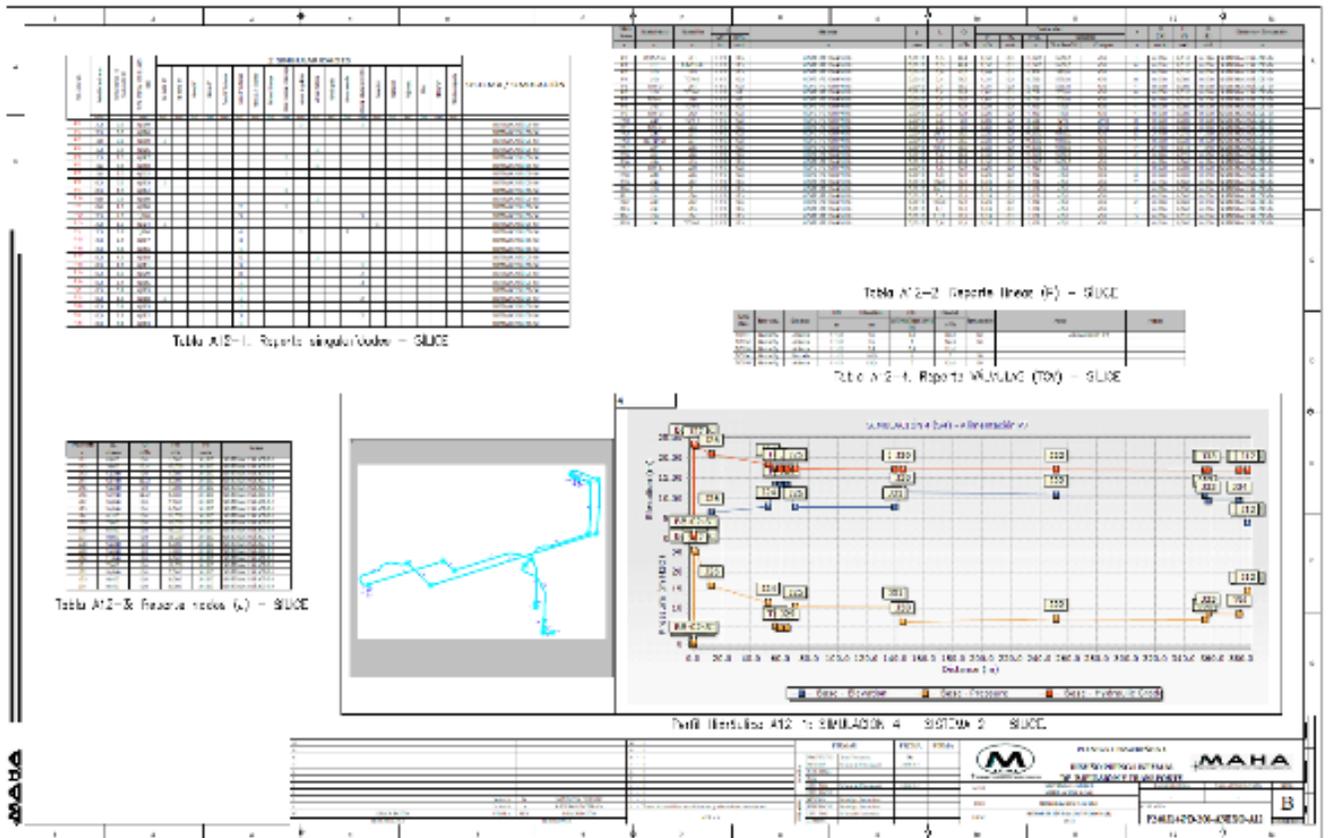


### 5.6 TRANSPORTE DE CELULOSA, SILICE Y CAOLI

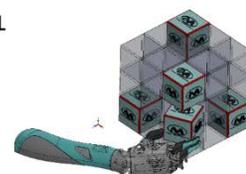


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



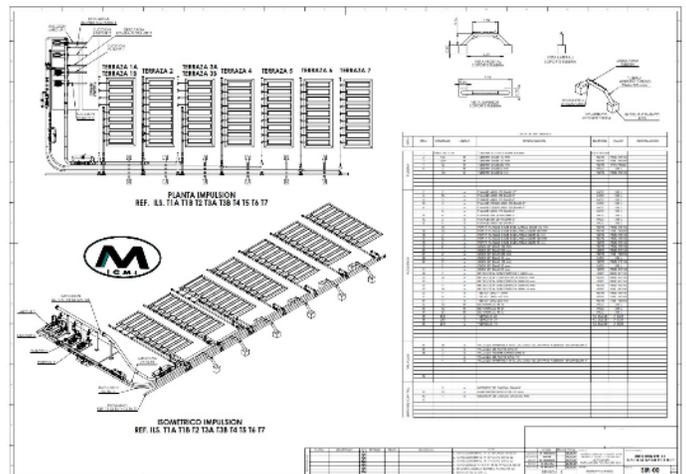
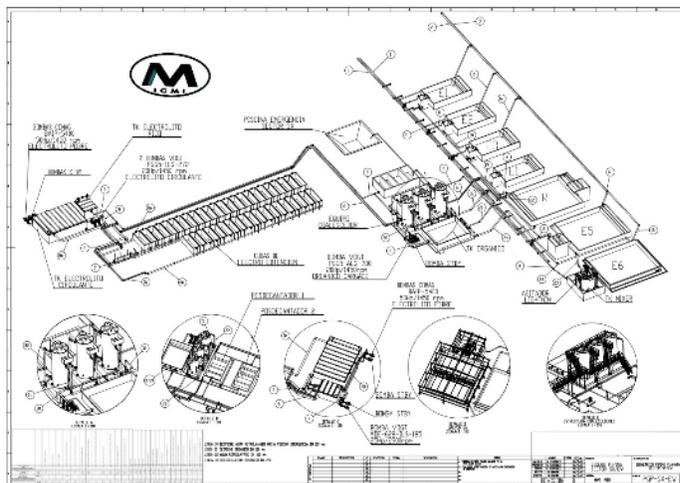
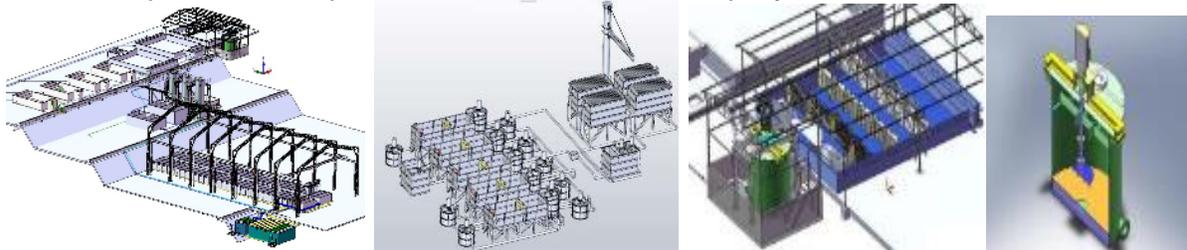


## 6. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES PARA OBTENCIÓN DE COBRE.

MAHA ICMI en sus líneas de productos, ha desarrollado equipos y componentes para el diseño de plantas unitarias para experiencias de simulación de los procesos hidrometalúrgicos de obtención de cobre y otros en la minería metálica y no metálica.

Estos simuladores otorgan parámetros orientados a los análisis de los reactivos en función de los minerales tratados, análisis del comportamiento del diseño en función del tipo de mineral entre otros índices.

Nuestra empresa diseña y construye Plantas Industriales de Simulación, con los componentes requeridos para cada experiencia específica, cuidando su armonía de operación para la obtención de resultados medibles y aplicables a posibles correcciones en procesos de producción industrial. Para estos efectos se dispone de profesionales vinculados a estos procesos, capaces de interpretar los requerimientos específicos de los usuarios en términos de la búsqueda de la optimización en determinado proyecto.

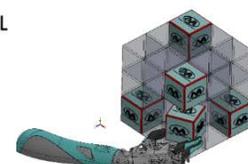


### 6.1 GENERALIDAD DEL SERVICIO

Plantas de extracción por solventes para la recuperación electrolítica del cobre LIX-SX-EW.  
Infraestructura para el soporte de inhalaciones.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





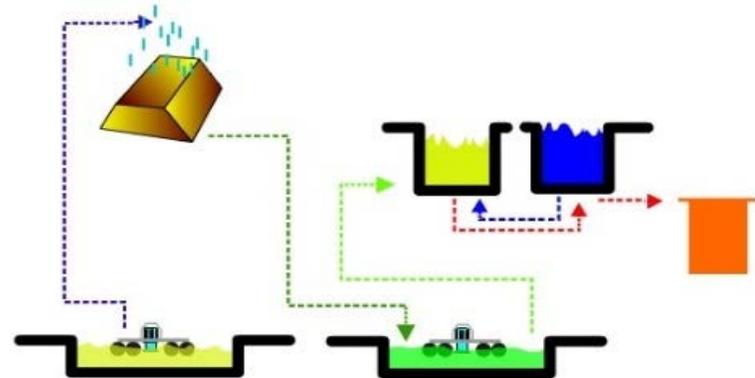
- Diseño de Procesos y Equipos. **2D, 3D.**
- Balances de masa y energía para la eficiencia energética.
- PLANTAS PILOTO (Unitaria) - Pilotaje de sistemas LIX - SX - EW.
- Diseño PIPING de redes de distribución electrolitos circulantes, orgánicos y refinos. Piping en materiales de: Acero, HDPE, Ac. Inox., PVC, CPVC y Ac. Galvanizado.



## 6.2 COMPONENTES PRINCIPALES

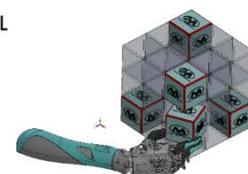
MAHA ICMI, dispone de los elementos de recambio para Plantas Existentes los que pueden ser requeridos para su incorporación a los equipos en operación, de acuerdo a la siguiente disponibilidad de suministro.

- Bombas Centrífugas Horizontales.
- Bombas Dosificadoras.
- Variadores de Velocidad.
- Celdas de proceso.
- Agitadores Mecánicos.
- Agitadores Estáticos.
- Estanques Roto moldeados.
- Bandómetros para control de capas.
- Piping.
- Medidores de Flujo.
- Estanques.
- Celdas electrolíticas
- Red de aspersores REF.



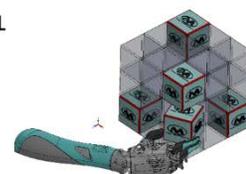
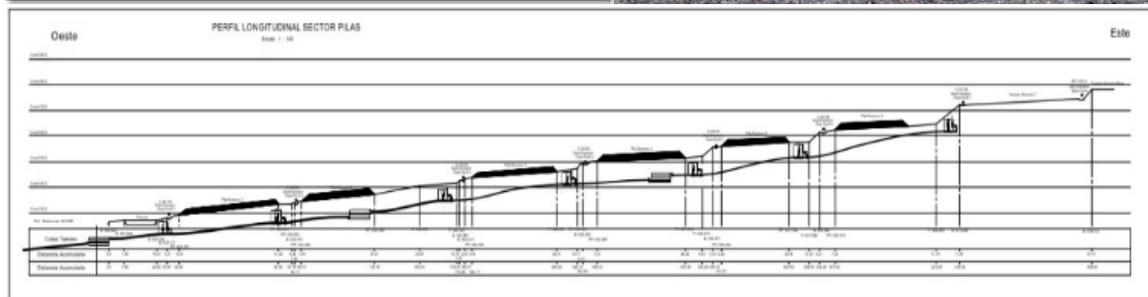
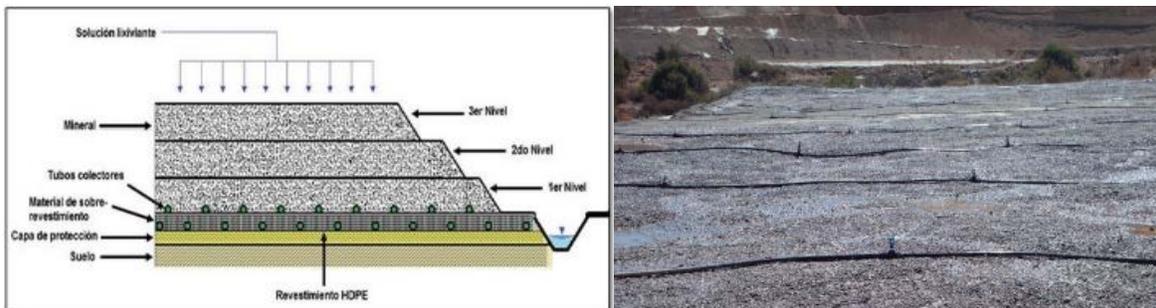
## 6.3 ALCANCES MAHA ICMI

- Diseño proceso de LIX.
- Fabricación y suministro de columnas de lixiviación. Fabricación en largos de hasta 6m y en diámetros desde 160 mm. Fabricación para pruebas en acrílicos transparente desde diámetro de 60 mm.
- Implementación sistemas de riego.
- Riego en contracorriente con registro de flujos de distintas soluciones.



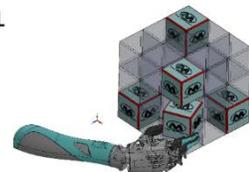


- Implementación de esquemas hidrodinámicos de riego con pozos/bomba; piping; redes de riego; válvulas de control.
- Registros de flujos efectuados con sensores de señal hasta monitores con capacidad de registro para totalizar lecturas parciales.
- Pilotaje de sistema LIX.
- Diseño de terrazas y pilas de LIX.
- Diseño de redes de distribución REF y PLS.
- Sistemas de Lixiviación en Columnas de PVC o Polietileno, para análisis de laboratorio. Aptas para pruebas metalúrgicas.
- Diseño con sistema de volteo para carga y descarga de mineral. Implementadas con estanques auxiliares y bombas si el proceso lo requiere.
- Se incluyen dosificadores para establecer tasas de riego. Estanques para la captación de soluciones y diseño para la operación en contracorriente de las soluciones de lixiviación.
- Diseño sistema de aglomeración.
- Diseño hidráulico y de distribución pilas de mineral.
- Impulsión y distribución de REFINO y PLS.
- Riego automatizado por aspersión. Sistemas de control en las diferentes etapas del proceso.
- MANUAL DE OPERACIÓN.





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 6.4 ETAPA DE CHANCADO Y TRITURACION

### 6.4.1 ETAPAS Y EQUIPOS

Como todos los procesos de conminución, la trituración requiere de un elevado consumo energético, por lo que tiene gran impacto económico en el desarrollo de cualquier proyecto de hidrometalurgia.



Plantas de chancado secundario y terciario. Faena Radomiro Tomic

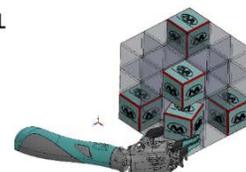
La energía necesaria para la trituración se calcula experimentalmente, midiendo la fuerza necesaria (kilopondios-m/cm) para romper probetas de la roca mediante una máquina de impacto.

A partir de esta fuerza se calcula el Índice de Trabajo (Work Index  $W_i$ ), que entrega los kilovatios/t necesarios para realizar la trituración o chancado, desde un tamaño medio de alimentación (granulometría del material de inicio) al tamaño medio del producto (granulometría del producto). La molienda húmeda tiene un gasto energético mayor que la trituración seca, y por tanto un mayor costo. De esta forma, el tamaño final de las partículas estará limitado por la operatividad en seco. Por lo tanto, con un material húmedo y una cantidad apreciable de finos, el tamaño final de trituración o chancado debe ser mayor que con materiales rocosos y secos. Considerando el menor costo de trituración seca, se puede llegar a productos de tamaños límites inferiores a 6 mm, (entre 3 y 4 mm,) que es el equivalente a la trituración o chancado cuaternaria.

### 6.4.2 TAMAÑO DE TRITURACIÓN O CHANCADO Y ELECCIÓN DE EQUIPOS

El proceso de chancado se realiza dos grandes etapas, las cuales requieren de equipos específicos para lograr la granulometría adecuada:

- Trituración o chancado primario o grueso.



- Trituración o chancado fino: que comprende las etapas de chancado secundario, terciario y cuaternario.

La selección del tipo y tamaño del equipo chancador para cada etapa se determina según los siguientes factores:

- Volumen de material o tonelaje a triturar.
- Tamaño de alimentación.
- Tamaño del producto de salida.
- Dureza de la roca matriz, ya que la proporción de mineral suele ser pequeña. Éste es un índice importante, que se expresa normalmente por la escala de Mohs, que tiene implicancia al momento de seleccionar el tipo de equipo a utilizar.
- Tenacidad, según en el índice de tenacidad de la roca a triturar, el que se compara con el de la caliza, a la que se le asigna el índice 1.
- Abrasividad, debida fundamentalmente al contenido de sílice, que es el principal causante del desgaste de los equipos. Según el índice de abrasividad, medido experimentalmente a través del porcentaje de sílice presente en la roca, éstas se clasifican en:

Clasificación	Porcentaje de Sílice (%)
Poco abrasiva	< 0,05
Abrasiva	0,05 - 0,50
Muy abrasiva	0,5 - 1
Extremadamente abrasiva	> 1

- Humedad del material en el yacimiento y en la planta, según las condiciones climatológicas del lugar.
- Contenido de finos y lamas. Los materiales lamosos o pegajosos pueden disminuir la permeabilidad, originando dificultades en la percolación posterior.

Para cada una de estas etapas existen equipos apropiados, cuyas características principales de abertura de alimentación, capacidad a distintos cierres, tamaños de productos, potencia, etc., suelen ser tabuladas por los fabricantes de trituradoras en función de una densidad y dureza media. En general, se recomienda no moverse en los extremos límites de trituración (máxima razón de reducción) sino considerar los valores medios propuestos por las tablas de

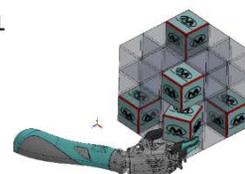


los fabricantes de equipos. Para lixiviación en pilas el mineral se suele triturar a tamaños entre 100 y 250 mm, para lixiviación en depósitos o tanques, entre 50 y 1 mm, para lixiviación dinámica, chancado y molienda a tamaños inferiores a 1 mm. Independientemente de otras variables, el tamaño de partícula de mineral o metal a lixiviar define la velocidad de disolución y, por consiguiente, el porcentaje de recuperación en un tiempo determinado. Por sobre los 2 mm (10 mallas), el tamaño de las partículas impide efectuar una lixiviación dinámica operativa (agitación). Si se desea una molienda más fina debe considerarse además del incremento en costo de energía, la posible producción de lamas, sobre todo en el caso de minerales friables como son los de estaño o wolframio. Según prácticas industriales, unos tamaños típicos de menas para lixiviación de distintos minerales pueden ser los siguientes:

Mineral	Tamaño mm (malla ASTM)
■ Cobre oxidado	-12,00
■ Oro	-0,25 a (-60 mallas)
■ Concentrado de oro (sulfuros)	-0,044 a (-325 mallas)
■ Uranio	-2 a -0,15 (-10 a -100)
■ Bauxita	-0,15 a (-100)
■ Ilmenita	-0,074 a (-200 mallas)
■ Laterita (níquel)	-0,841 a -0,074 (-20 a -200 mallas)
■ Concentrado de níquel (sulfuros)	-0,074 a (-200 mallas)
■ Calcinados de zinc	-0,074 a (-200 mallas)

De manera general, según el método que se aplique, pueden considerarse los siguientes tiempos de lixiviación:

	Método de lixiviación	Tamaño (mm)	Tiempo aproximado
■ Estática	En sitio	Grandes y variable	Variable
	En vacies	Hasta 1500	Años
	En pilas	Hasta 150	1 a 6 meses
	En tanques	Hasta 12	15 a 30 días
■ Dinámica	Con agitación	Hasta 2	2 a 24 horas
	Con agitación	Hasta 0,010	1 a 10 horas



La siguiente tabla es una guía para la selección preliminar de los tipos de trituradoras que se recomienda utilizar, dependiendo del material que sea necesario triturar (según Neuhoff).

### 6.4.3 DISEÑO DEL PROCESO DE TRITURACIÓN Y CHANCADO

Antes de que el material se lleve a la trituración o chancado, se recomienda realizar el cribado, que consiste en el harneo o selección de tamaño previo, segmentando en diferentes granulometrías. Este proceso tiene ventajas tales como que aumenta la capacidad del equipo, evita las dificultades que provocan los finos en las cámaras trituradoras (atascos), reduce el consumo de energía y permite obtener un producto final con menos finos. En el diseño de una trituración y en la perspectiva de reducir los costos de operación, principalmente de la trituración primaria, se deben tener en cuenta los siguientes factores.

#### 6.4.3.1 LOCALIZACIÓN

Dada la ubicación de la mina y la planta, la localización de la trituradora (chancador) es aquella en que la distancia económica entre esos dos puntos sea la mínima. Además, por aspectos de de seguridad (tronaduras) , el chancador primario se ha mantenido hasta hoy relativamente alejada de la mina. Sin embargo, se debe tener presente que el transporte del material ya triturado es menos costoso (menor volumen y menor impacto en las cajas de camiones) y más continuo que el material que viene de la mina. Por ello, sería más conveniente ubicar el chancador primaria lo más cerca posible del yacimiento e incluso dentro de él.

#### 6.4.3.2 TRANSPORTE DEL MINERAL A LA TRITURACIÓN O CHANCADO

Generalmente se afirma que un 40% del costo minero en una explotación a cielo abierto corresponde a las operaciones de perforación, tronadura y carguío, y que el 60% restante se asigna al transporte del material a la planta. Está demostrado que el transporte por camiones, a pesar de su flexibilidad, es más costoso que el que se realiza por cintas transportadoras. Sin embargo, se debe tener presente que este último tipo de transporte encuentra su limitante en el tamaño del material. Por lo tanto, un transporte por cintas requiere la trituración o chancado en el yacimiento.



Transporte de mineral en una faena a cielo abierto. Radomiro Tomic.

Considerando el transporte del material y la movilidad de éste, se distinguen cuatro tipos de plantas:

#### 6.4.3.3 PLANTA FIJA O ESTACIONARIA

En estas, la planta de trituración permanece en el lugar de la instalación durante gran parte de la vida del yacimiento. En estos casos y en lo posible ésta debe localizarse cerca del yacimiento y en un nivel inferior respecto de la zona de extracción, para contar con un transporte descendente de los camiones cargados.

#### 6.4.3.4 PLANTA SEMI-FIJA O SEMI-ESTACIONARIA

Se instalan en faenas de períodos largos en las que se prevé la reubicación de la planta de trituración o chancado, por lo tanto, sus equipos y bases se construyen para ser individualmente desmantelados y transportados al nuevo lugar, aún cuando se pueda perder parte de los cimientos de apoyo.

La nueva localización requiere de un acondicionamiento del lugar, incluyendo la construcción de nuevas fundaciones, lo que puede ocupar algún tiempo y provocar el cese temporal de producción.

#### 6.4.3.5 PLANTA SEMI -MÓVIL O SEMI-PORTÁTIL

Este tipo de plantas se construyen por unidades (tolvas, trituradoras, cribas, etc.), las que se montan sobre plataformas o bases metálicas, para ser trasladadas con transportes especiales, a los que se les acoplan estas unidades móviles. Requieren cierta preparación del terreno y originan paralizaciones breves de producción (del orden de semanas).

#### 6.4.3.6 PLANTA MÓVIL O PORTÁTIL

Estas plantas van equipadas con un sistema de transporte integral; la mayoría auto transportables y montadas sobre ruedas con cubiertas de goma, zapatas de orugas o railes. Debido a su excelente maniobrabilidad y su aceptable movilidad de traslado, se localizan junto al rajo de la mina, para ser alimentadas directamente por el equipo de carga. Como se mueven frecuentemente, necesitan de un sistema adicional de transportadores flexibles que les permitan acoplarse al transporte general de la planta de concentración.

Hasta hace algo más de una década, el incremento de la movilidad del sistema estaba limitado por el tamaño de los equipos. Las primeras unidades móviles fueron pequeñas trituradoras para la producción de áridos en canteras.



En el extremo inferior izquierdo se pueden visualizar la unidades de chancado en el rajo de la mina de Chuquicamata.

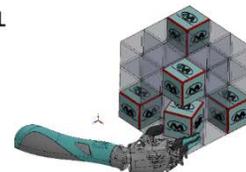
La gran masa que poseen chancadores de cierta capacidad, la altura y las grandes fuerzas desarrolladas por las excéntricas, hacían difícil su adaptación a unidades móviles. Sin embargo, los avances obtenidos en los diseños y en las nuevas técnicas de construcción han hecho posible que hoy en día existan grandes trituradoras móviles. En la mina de Chuquicamata hay dos unidades semi-estacionarias de trituración gigantes, que tienen la mayor capacidad del mundo. Cada una consta de una trituradora giratoria 89/109" con capacidad media de 8200 t/h. Trituran material estéril (montera) para sacarlo de la mina por medio de cintas transportadoras que tienen pendientes de 17/18°.

#### 6.4.4 PRUEBAS DE CHANCADO DEL MINERAL

Los resultados, evaluados con criterios económicos y en combinación con los de otras pruebas, determinan los tamaños máximos de tratamiento y por lo tanto, de mínima inversión de costos de operación, que no afecten una alta extracción del metal en un tiempo razonablemente corto. Las pruebas de chancado muestran la distribución granulométrica de trabajo esperada para la lixiviación, la que estará orientada a generar un mínimo de finos,



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



según lo factible de obtener en un circuito de chancado industrial, para evitar problemas de percolación del lecho.

- Comprende el análisis granulométrico de la muestra recibida a tamaño natural.
- Incluye las determinaciones del "Work Index" (Índice de Trabajo) del mineral.
- Proporciona las curvas de distribución granulométrica, a varios tamaños de chancado máximo, para las pruebas de tratamiento.
- Definen el límite inferior del tamaño de chancado, basándose en el contenido de finos generado en cada tamaño máximo de chancado ensayado.
- En combinación con análisis químicos, proporciona los contenidos de cobre total y soluble por cada fracción granulométrica.

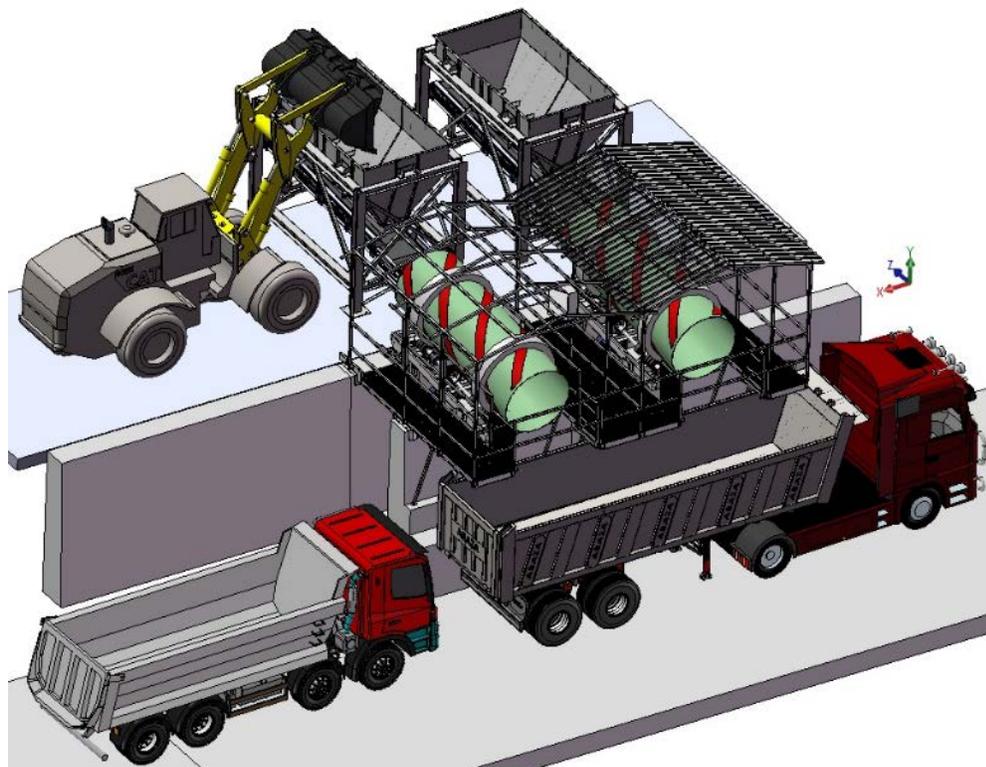
## 6.5 ETAPA DE AGLOMERACIÓN DE MINERAL

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación, de manera de asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución. Un factor crítico a veces no suficientemente investigado y que en muchos casos ha conducido a fallas o al cierre de las plantas en operación, es la permeabilidad. La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones) finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos. Con proporciones del 10-20% de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida. De esta forma, los efectos de una proporción inadecuada de finos pueden influir en aumentar innecesariamente el tiempo de lixiviación y con ello aumentar el consumo de reactivos, provocar una menor extracción de soluciones mineralizadas y hasta hacer que un proyecto sea inviable. Para solucionar estos inconvenientes y asegurar un buen proceso de lixiviación es recomendable la eliminación de finos. Para ello se puede proceder de la siguiente manera:

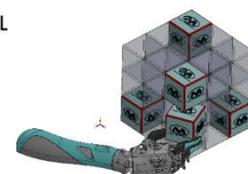




Tambores aglomeradotes de la Faena Radomiro Tomic.



- Realizar un análisis granulométrico y químico del metal valioso por fracciones, y realizar cortes teóricos a diferentes tamaños. Un rechazo del 40-50 % en peso del material, con sólo una pérdida de 5-10% en metal (dependiendo de su valor), podría ser



económicamente viable, aunque no es normal. Por ejemplo, si en un yacimiento el oro y la plata están bastante distribuidos en todas las fracciones, se pierde valor con cualquier corte y rechazos de peso aceptables.

- Realizar la separación de tamaños finos y gruesos, efectuándose la lixiviación estática sólo en estos últimos, normalmente con leyes más bajas y la lixiviación dinámica con los finos, normalmente enriquecidos. Existen casos en que por este sistema se ha logrado una mayor y más rápida recuperación que por una íntegra lixiviación estática.
- Realizar una aglomeración, que es el procedimiento más empleado en la actualidad. En términos generales, la aglomeración consiste en un procedimiento que permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

En la aglomeración ocurre la adhesión de las partículas finas a las gruesas, las que actúan como núcleos, a partir de la distribución de tamaños en la alimentación. A veces puede tener lugar de manera natural al manipular los materiales con cierta humedad, por ejemplo en las cintas transportadoras, en el mezclado o incluso en el momento de la caída sobre la pila. Sin embargo, mediante la humedad se logra una unión débil e insuficiente en la mayoría de los casos.

### 6.5.1 AGLOMERACIÓN POR HUMEDAD

Este es el proceso más simple de aglomeración y consiste en humedecer el material con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los gruesos. Esta aglomeración suele ser muy débil y sólo se emplea en casos fáciles, con bajo contenido de finos. El procedimiento más sencillo de lograr la aglomeración por humedad es el riego, el que puede efectuarse de la siguiente manera:

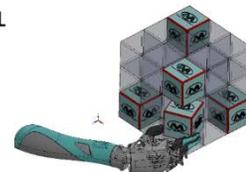
- Sobre las transferencias de las cintas que transportan el mineral a la pila, con la dificultad de mojar la correa.
- Al caer el material de la cinta en la formación de la pila. Adaptando el riego a los tamaños más gruesos (mayor desviación en la caída) la aglomeración puede ser más selectiva.
- Sobre la superficie de la pila, conforme vayan formándose los lechos o capas de mineral.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



www.maha.cl  
maha@maha.cl / +569-78785939



La práctica y la experiencia definirán la humedad óptima y el sistema de riego más apropiado. A veces, cuando el proceso en sí, se necesita de un medio alcalino (lixiviación de oro y plata por cianuración) se puede emplear como aglomerante la cal en solución.

### **6.5.2 AGLOMERACIÓN POR ADHERENTES**

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como en la operación de lixiviación. Estos materiales adherentes o aglomerantes han sido ampliamente estudiados, principalmente por el USBM de EE.UU., determinando experimentalmente tres parámetros principales del proceso:

- El tipo y cantidad de aglomerante añadido a la alimentación seca.
- La humedad necesaria en la mezcla mineral / aglomerante.
- El período de curado para favorecer los puentes de silicato cálcico.

Teóricamente, la aglomeración con aglutinantes es un proceso no bien definido. Parece ser que es similar a la floculación, es decir, se forma una especie de coagulación por unión de las partículas arcillosas coloidales con los agentes y electrolitos en solución. Se forman así aglomerados porosos muy estables y resistentes a la manipulación y condiciones de lixiviación.

### **6.5.3 CARACTERÍSTICAS Y FACTORES DE LA AGLOMERACIÓN**

Para que el proceso de aglomeración sea efectivo, es necesario disponer de una serie de dispositivos y equipos, algunos de los cuales pueden formar parte de la propia planta. Es el caso de una trituración con una serie de cintas transportadoras, para descarga del producto triturado, en donde puede aplicarse la aglomeración en las transferencias son equipos adicionales. Para que se realice una buena aglomeración, especialmente en los minerales de cobre, se deben considerar ciertas características del material mineralizado, entre las que se tiene el tamaño y geometría de las partículas, granulometría, características geológicas, ley de cobre en la mena, condiciones ambientales, evaporación del agua, humedad del curado, tiempo de curado, entre otras.



#### 6.5.4 PRINCIPALES AGLOMERANTES

- **Cemento Pórtland, tipo 2:** que es el mejor aglomerante, empleado en proporciones que pueden variar de 1 a 5 kg/t.
- **La cal:** también es un buen aglomerante y su empleo es práctico cuando la lixiviación tiene lugar en medio alcalino.
- **Cenizas y polvos de hornos o de centrales térmicas:** también pueden emplearse como aglomerantes, dependiendo de su disponibilidad y economía. Se debe tener en cuenta la posibilidad del contenido de ciertos metales solubles, que pueden interferir la química de la lixiviación.
- **Ácido sulfúrico y sulfatos,** que se utilizan para procesos en medio ácidos.

#### 6.5.5 CONDICIONES INICIALES DE AGLOMERACIÓN Y CURADO

Se definen las condiciones iniciales del proceso de tal manera que entreguen un aglomerado de buena calidad y una disolución del cobre lo más alta posible. Las variables que afectan el proceso de aglomeración y de curado son:

- **Geometría de las partículas:**

su principal efecto es el aspecto físico, aunque también afecta la velocidad de reacción. De esta variable depende el grado de adherencia de las partículas más pequeñas a las más grandes. Con un material representativo esta variable se puede considerar constante.

- **Granulometría:**

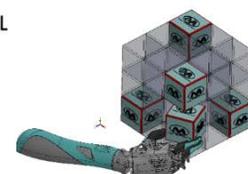
la influencia fundamental de esta variable es en el aspecto químico, ya que influye fuertemente en la velocidad de la transformación química. En el aspecto físico su influencia radica en el hecho que a menor granulometría se produce una mayor producción de finos, disminuyendo las cualidades físicas y aumentando la probabilidad de que erosionen los aglomerados, produciéndose posibles segregaciones de finos que a su vez son capaces de provocar canalizaciones e impermeabilizaciones al interior del lecho.

- **Características geológicas:**

el tipo de mineralización y la ganga asociada, entre otras características, ejercen una fuerte influencia en el aspecto físico y en el químico.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



- **Ley de cobre en la mina:**

influye en los aspectos físicos y químicos. Define la cantidad de ácido, de agua, en forma conjunta con la humedad de aglomeración y la concentración de reactivo. Si la ley de cobre aumenta, aumenta la cantidad de ácido sulfúrico, disminuye la cantidad de agua y aumenta la concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la aglomeración, afectando así ambos aspectos.

- **Condiciones ambientales:**

esta variable no se puede manejar. Cuando la temperatura es muy alta y en un ambiente seco, la evaporación de agua aumenta considerablemente influyendo en el tiempo de curado y en las propiedades físicas y químicas del lecho. Cuando ocurre lo contrario, cuando la temperatura es muy baja y la humedad ambiental muy alta, la calidad física del lecho disminuye y el tiempo de curado se alarga demasiado, pero el grado de sulfatación puede aumentar en forma considerable.

- **Evaporación del agua:**

esta variable no se puede controlar. A medida que se evapora el agua, el lecho va ganando físicamente en desmedro del efecto químico, que tiende a detenerse. Si la cantidad de agua es prácticamente nula, el efecto químico se ha detenido y las cualidades físicas desaparecen, se destruyen los aglomerados.

- **Concentración del ácido sulfúrico:**

queda determinado con la humedad de aglomeración y la dosificación de ácido sulfúrico.

- **Humedad del curado:**

este parámetro juega un rol importante en el proceso, ya que define la cantidad de solución aglomerante que se debe agregar en el curado. Junto con la dosificación y por ende con la ley de cobre, define la cantidad de agua a agregar en la aglomeración.

- **Cantidad de agua:**

parámetro crítico en la operación de aglomeración y curado. Su total ausencia es nefasta en los aspectos químico y físico. En el aspecto físico influye en la formación de puentes líquidos y fuerzas capilares que dan al lecho las cualidades físicas que requieren. En el químico, es el medio de transporte utilizado por los iones de hidrógeno para difundir a través de las partículas

hacia el núcleo de la reacción y es el medio de transporte utilizado por los iones cúpricos, producto de la reacción, para emerger a la superficie de las partículas. Esta variable se determina por la dosificación de ácido, ley de cobre, que a su vez determina la cantidad de ácido y por la humedad de aglomeración.

- **Tiempo de curado:**

esta variable influye directamente en el grado de aglomeración y sulfatación. Depende de las condiciones climáticas de las reacciones químicas exotérmicas que pueden ocurrir al interior del lecho que provoca evaporación de agua y fundamentalmente en la cantidad de agua presente en el proceso. Su determinación obedece a una decisión más bien cualitativa que cuantitativa, ya que se debe considerar la calidad física del lecho y el grado de sulfatación, pero la calidad física es muy difícil de medir cuantitativamente con los recursos de laboratorio.

- **Dosificación del ácido sulfúrico:**

labor fundamentalmente química, debe ser capaz de entregar la cantidad de ácido suficiente para lograr sulfatar la mayor parte del cobre que sea posible. Indirectamente influye en el tiempo de curado, a mayor dosificación mayor cantidad de ácido, menor cantidad de agua y mayor concentración en la solución de curado. También influye en el aspecto físico porque las reacciones químicas exotérmicas evaporan el agua existente en el sistema. Las variables que se estudian en las experiencias de laboratorio suelen ser granulometría y dosificación de ácido sulfúrico. En términos generales, para una buena aglomeración es recomendable que:

- La adición del o los aglomerantes se realice sobre el mineral relativamente seco. Por ejemplo, realizarla en la trituración o chancado si está incluida en el esquema de tratamiento.
- La mezcla entre mineral y aglomerantes sea lo más íntima posible.
- Adicionar la cantidad de líquido o de solución que sea necesaria para alcanzar la humedad óptima de aglomeración.
- Se considere un cierto tiempo de reposo o curado, antes de proceder a la lixiviación. A mayor cantidad de finos, se necesitarán más aglomerantes y más tiempo de curado. Como mínimo debe existir un período de reposo de unas 24 horas.

La aglomeración se puede efectuar tanto en medio ácido como en medio alcalino (básico), con las particularidades que se describen a continuación:

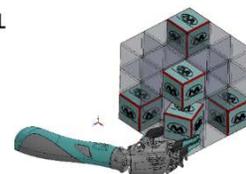




- **Medio ácido.** Este medio es típico de la lixiviación de minerales de cobre y uranio, el mismo lixiviante ácido se puede emplear como aglomerante, generalmente en forma de ácido sulfúrico concentrado. Se ha propuesto también el empleo de aglomerantes ácidos sólidos, como los sulfatos (yeso), pero no es normal, aparte de los efectos perniciosos de las posibles incrustaciones por precipitación posterior en pilas y tuberías.
- **Medio alcalino.** El caso más típico es la aglomeración de minerales de oro y plata. En este caso los aglomerantes son normalmente cemento y cal. El cianuro en forma líquida y a alta concentración, se emplea más bien como agente de humedecimiento durante la aglomeración.

En la siguiente tabla se resume los sistemas de aglomeración más comunes:

Tipo de mineral	Granulometría	Sistema de aglomeración	Aglomerante
■ Oro y plata	Gruesa (15mm o similar) Sin arcillas	Sistema de cinta simple con descarga en pila o depósito de lixiviación	Solución de cal
■ Oro y plata	Fina (-15mm o más fino) Sin arcillas	Sistema de tres cintas o una cinta y artesa vibratoria	Cal
■ Oro y plata	Gruesa (-15mm o similar) Con arcillas	Sistema de tres cintas en cascada como mínimo y barras mezcladoras	Cemento y cal
■ Residuos de oro y plata	Menor de 0.2mm o más fino	Tambor rotatorio. Artesa inclinada vibratoria.	Cemento y cal
■ Cobre-uranio	Gruesa de 15mm o similar	Sistema simple de cinta transportadora	Ácido sulfúrico
■ Cobre - uranio	Fina (-15mm o similar) Limitada cantidad de arcillas	Tambor rotatorio	Ácido sulfúrico





Apilador usado en Radomiro Tomic, con una capacidad de 10.500 t/h.

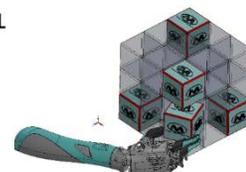
## 6.6 ETAPA LIXIVIACIÓN EN PILAS (HEAP LEACHING) - LIX

La lixiviación es un proceso de hidrometalurgia mediante el cual se extraen minerales a partir de las menas que reúnen determinadas características. Para realizar la lixiviación se deben reunir dos condiciones generales:

- Que los minerales sean lo suficientemente valiosos para intentar reducir las pérdidas en el residuo, pero no lo bastante ricos como para pagar un proceso de tratamiento más desarrollados y costosos.
- Disponer del capital suficiente de manera de implementar este proceso para lograr un aprovechamiento óptimo del mineral, y un mayor control geométrico y químico que los vertederos.

La lixiviación consiste en regar el material mineralizado extraído de la mina, cuyas características de ley y granulometría son conocidas, con soluciones de lixiviación ajustadas a ellas, y que consideran tanto las velocidades de reacción como los tiempos de dilución, para obtener el mineral a partir de una solución.

El tratamiento de lixiviación en pilas requiere del desarrollo de un procedimiento secuencialmente ordenado que consiste en las siguientes etapas.



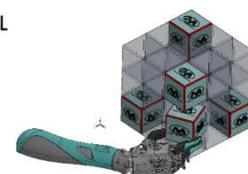


Minerales oxidados de Cobre, procesados vía lixiviación

En el esquema general del proceso, tanto el mineral procedente de la explotación a cielo abierto o subterránea, como el de viejos vertederos integrados en programas de aprovechamiento, debe ser ligeramente preparado en una planta de trituración o chancado y luego de aglomeración si es necesario, para conseguir una granulometría controlada, que permita asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución. El principal propósito del chancado es efectuar las reducciones de tamaño necesarias, hasta obtener un producto de una granulometría adecuada que permita el desarrollo del siguiente proceso (la lixiviación en pilas o depósitos) en forma eficiente. Para realizar el proceso de lixiviación se requiere disponer de un patio, o superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizarlo con nuevo material se trata de lixiviación en depósitos. Si el patio no es recuperado y el mineral agotado queda en la pila como vertedero que se restaura, se trata de lixiviación en pilas.



Pilas de lixiviación de Radomiro Tomic, de dimensiones 1300 m de largo por 380 m de ancho, con un apilamiento de 10 m de altura y un ángulo de reposo del material de 37°.



Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada (pilas) para proceder a su riego con una solución preparada. Tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal). Pilas de lixiviación de Radomiro Tomic, de dimensiones 1300 m de largo por 380 m de ancho, con un apilamiento de 10 m de altura y un ángulo de reposo del material de 37°. Para la lixiviación en pilas se requiere de ciertos elementos, condiciones y consideraciones tales como:

- Disponer de amplias superficies de terreno, relativamente llanas, con menos de 10% de pendiente.
- Calcular los flujos de aporte y evaporación para mantener un balance equilibrado de líquidos efluyentes.
- Disponer de represas de líquidos intermedios y finales.
- Considerar un margen de sobrecapacidad del sistema para absorber situaciones de exceso por tormentas lluvias en el área en explotación o explotada.
- Capacidad y flexibilidad para admitir grandes variaciones de leyes de mineral y tiempos de lixiviación.
- Utilizar láminas impermeables sencillas para evitar pérdidas por infiltración y la contaminación del subsuelo.
- Realizar un estudio geomecánico del material depositado para alcanzar la máxima altura posible y evitar el derrumbe de la pila.
- Preparar el material para llevarlo al tamaño adecuado, de manera de lograr una permeabilidad mínima suficiente, que libere el mineral en la superficie y percole adecuadamente.
- Organizar un conjunto de pilas de manera de ordenar el flujo de líquidos en forma seriada, para lograr un enriquecimiento progresivo de la solución al pasar de una pila en otra.

Para que la lixiviación tenga éxito se tienen que considerar una serie de factores, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo. El óptimo contacto entre el material y el agente lixivante depende de los siguientes factores, los que deben ser considerados en todas las etapas del proceso:

- La localización de los minerales a disolver



- Volumen del material y distribución de tamaños
- Área expuesta
- Superficie específica
- Tamaño de partículas
- Porosidad
- Presión capilar
- Rugosidad o aspereza de las superficies.
- Construcción de las pilas y apilamiento
- El mineral aglomerado con cierta cantidad de ácido y de agua (en kg/t) según su mineralogía y su ganga, se acomoda en las pilas, que formarán los módulos de riego, con superficie y altura determinadas, ángulo de reposo del mineral ya establecido, y con pendiente en dos sentidos:
  - Inclinación lateral, para el drenaje
  - Inclinación en sentido longitudinal, para la evacuación de las soluciones

A este material mineralizado apilado y preparado, se le determina la densidad aparente que varía según su porcentaje de finos. El apilamiento se puede realizar por distintos métodos, entre ellos mediante un sistema de correas o mediante apiladores móviles. Las pilas se cargan habitualmente entre 3 y 8 metros, sobre un sustrato impermeable, normalmente protegido con una membrana de plástico de tipo polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 a 1,5 mm de espesor según las exigencias de cada aplicación. Para ayudar a la recolección de las soluciones, se usan cañerías de drenaje perforadas y canaletas abiertas. De acuerdo con la utilización de las pilas se tienen:

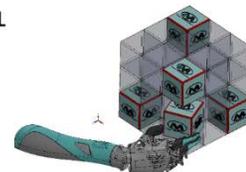
- Pilas dinámicas denominadas también de tipo "on-off", en las que el mineral se remueve, se envía a botadero después de la lixiviación y la base de la pila se puede reutilizar. Para las pilas dinámicas, se puede elegir cualquier configuración que sea aceptable para la operación de los equipos de carga y descarga, pero generalmente, se prefiere un rectángulo alargado. En el caso particular de las operaciones mayores, que presentan ciertas rigideces con los equipos de transferencia de minerales, se ha preferido una configuración rectangular doble (dos rectángulos paralelos y adyacentes) con semicírculos en los extremos, donde se forma la pista de giro de los equipos de carguío y de descarga.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



www.maha.cl  
maha@maha.cl / +569-78785939





DIRECCIÓN PROFESIONAL DE  
PROYECTOS DE INGENIERÍA  
N°Doc: P150617-00A-MAHA-ICMI  
Página 88 de 159  
I C M I - INGENIERIA  
Rev.2 - 30-09-2017

- Pilas permanentes, en las que las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores, aprovechando o no la impermeabilización existente. La configuración de una pila existente puede tener cualquier geometría según las disponibilidades de espacio de cada lugar. Pero cuando no hay restricciones topográficas, normalmente se usa una configuración rectangular, en que una nueva capa sólo se podrá colocar cuando haya concluido la lixiviación de la capa inferior que se debe cubrir.

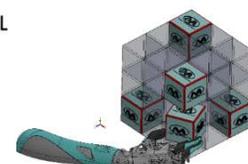
Para el carguío del material se utiliza una variedad de sistemas según el tamaño de las instalaciones de cada faena. En el caso de faenas pequeñas, que van desde 300 a 2.000 ton/día (Dos Amigos y Punta del Cobre) hasta 5.000 y 10.000 ton/día (Quebrada - Damiana en Salvador y Lince, en Michilla) se usan sistemas de camiones y apiladores de correa autopropulsados, evitando el uso de cargadores frontales, ya que destruyen los aglomerados. Este sistema de carguío se puede aplicar a pilas dinámicas y permanentes. En faenas mayores, que van desde 10.000 y hasta 50.000 ton/día (Mantoverde, Cerro Colorado y Quebrada Blanca) se usan correas modulares articuladas (grasshoppers) que terminan en un apilador de correa o "stacker". En este caso la operación puede ser realizada con pilas dinámicas o permanentes, sin restricción. En faenas aún mayores, desde 75.000 a 150.000 ton/día (El Abra y Radomiro Tomic) donde se prefieren complejos sistemas apiladores sobre orugas alimentados con correas transportadoras estacionarias y móviles. Cuando se requiere mover el material ya lixiviado desde las pilas, por ser un sistema de pilas dinámicas, normalmente se utilizan recolectores tipo pala de rueda con capachos, conocidos como "rotopala" o "bucketwheel". En estos casos de faenas mayores, se ha preferido en general el sistema de canchas de lixiviación dinámicas por el excesivo tonelaje de mineral, puesto que obligaría a un complicado movimiento permanente de avance de las correas alimentadoras, si se quisiera operar en pilas permanentes con avance continuo. Pero en Zaldivar y en el proyecto de ripios aglomerados de Chuquicamata, estos equipos han operado con un apila de tipo permanente y, por lo tanto, no han requerido instalar el sistema recolector de la rotopala.



Rotopala de capacidad nominal de 11.500 t/h. Sistema de traslación sobre orugas.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



Los minerales de cobre en sus diferentes menas, se encuentran en la naturaleza asociados entre sí y con otras especies mineralógicas, más o menos diseminadas dentro de una roca matriz con la ganga correspondiente. Para el desarrollo de un proyecto de lixiviación es necesario un conocimiento de las características del yacimiento y de la mena, y los factores que influyen en la lixiviación. En particular respecto a las características del yacimiento es importante considerar:

- Su composición mineralógica, por las interferencias que puedan producir en la lixiviación las diferentes especies conteniendo o no cobre.
- Diseminación de las especies: frecuencia y tamaños de los granos.
- Carácter de la ganga, ya que ciertos minerales pueden estar dentro de una ganga carbonatada y consumir ácido haciendo el proyecto inviable económicamente.
- Características físicas de la mena (cantidad de finos o lamas), así como sus propiedades de porosidad y permeabilidad, que son fundamentales en una lixiviación estática.
- Comportamiento de la roca en el chancado, en cuanto a crear o aumentar la fracturación, exponiendo una mayor superficie al ataque químico.

**PROCESO:** Factores como disponibilidad de ácido o álcali en solución, concentración de metal y/o solubilidad de la sal en solución, definen también la densidad más apropiada. En lixiviación estática no se puede hablar de densidad de pulpa como tal, ya que no hay una mezcla de líquido y sólido, pero sí un líquido percolado a través de un sólido heterogéneo. Sin embargo, en realidad existe una relación líquido lixivante - sólido percolado, la que normalmente es muy baja, del orden de 0,25: 1 con relación a la solución añadida, pero con una recirculación adecuada de soluciones estériles, se puede elevar hasta 1:1 e incluso más. Sin embargo en la lixiviación estática, no puede existir un control tan exhaustivo como en la lixiviación dinámica, ya que incluso a veces se llega a desconocer el tonelaje real a lixiviar y otras veces son los factores climatológicos (lluvias o sequía), los que hacen aumentar o disminuir la relación líquido-sólido como fuerza mayor.

### 6.6.1 PARAMETROS DE LA CINETICA DE DISOLUCION

Dentro de los parámetros fundamentales que afectan la cinética de la disolución de los minerales de cobre, y que son comunes para todos los metales, se deben considerar las siguientes características físicas y químicas:



### 6.6.1.1 TAMAÑO Y FORMA DE GRANOS EN PILAS

Los minerales o metales valiosos se presentan en una mena en tres formas diferentes: como partículas libres o puras, como partículas mixtas, con su superficie expuesta parcialmente o como partículas no liberadas y diseminadas en el interior de la roca y, por lo tanto, prácticamente inaccesibles a los reactivos químicos. Este tipo de partículas se le consideran normalmente como irrecuperables. A diferencia de otros procesos de concentración, como la flotación, la lixiviación no requiere una liberación total de las partículas, sino sólo la exposición parcial de su superficie. A veces este grado de exposición será suficiente con una fragmentación gruesa (voladura-trituración primaria), pero en otros casos será necesario una mayor conminución (trituración secundaria- molienda). En general, el límite económico de molienda viene dado por el punto en que una posterior reducción de tamaño, con aumento de la extracción y/o velocidad de extracción no es compensada por el aumento de los costos de inversión y producción de la planta, teniendo en cuenta el valor del yacimiento en reservas y leyes. Para lixiviación en pilas el mineral se suele triturar a tamaños entre 100 y 250 mm, para lixiviación en depósitos o tanques, entre 50 y 1 mm, para lixiviación dinámica, trituración o chancado y molienda a tamaños inferiores a 1 mm. Independientemente de otras variables, el tamaño de partícula de mineral o metal a lixiviar define la velocidad de disolución y, por consiguiente, el porcentaje de recuperación en un tiempo determinado. Si el tamaño de grano a lixiviar es muy fino (inferior a 40  $\mu\text{m}$ ), la molienda en circuito cerrado da pulpas diluidas que obliga a espesarlas.

### 6.6.1.2 LA POROSIDAD DE LA MENA

Afecta al proceso de difusión y si no existe una adecuada agitación, como en la lixiviación estática, los intersticios pueden ser rellenados por los sólidos en suspensión, dificultando la reacción.

### 6.6.1.3 LA PERMEABILIDAD O CAPACIDAD DE PERCOLACIÓN

De la solución a través del material, viene determinada por la granulometría del conjunto. Con materiales arcillosos y tamaños muy finos el lecho se hace impermeable, aún con escasa compactación natural (descarga por gravedad), y no hay contacto entre sólidos y reactivos, por lo que la lixiviación se ve impedida. Es un caso común en la lixiviación estática, a veces



superado por un pretratamiento por aglomeración de partículas finas, para evitar su arrastre y posterior deposición, permitiendo así una buena percolación.

#### 6.6.1.4 LA PRESENCIA DE LAMAS

Afecta incluso a la lixiviación dinámica, al recubrirse las partículas e inhibirse del ataque químico, aún con cierta agitación.

#### 6.6.1.5 LA TEMPERATURA.

Influye en los distintos tipos de reacciones químicas. Dentro de las etapas secuenciales del proceso de lixiviación, la temperatura debe afectar poco a los fenómenos de difusión. Según Arrhenius, la energía de activación es muy baja, del orden de 4 kcal/mol y su efecto es lineal. Pero en el estado de reacción química se pueden desarrollar energías más altas, del orden de 10 a 20 kcal/mol, dependiendo de la temperatura. Su efecto es exponencial. Así, en la lixiviación de ciertos minerales de cobre, oro y uranio, el control de la temperatura no tiene importancia y la lixiviación se efectúa a temperatura ambiente, aunque suelen obtenerse resultados ligeramente superiores en verano. En cambio, en la mayoría de las lixiviaciones controladas por la reacción química, el incremento de la temperatura es fundamental para incrementar la recuperación. Es el caso del aumento de la solubilidad de sustancias como sales (sulfatos, nitratos, etc.), óxidos (cuprita), hidróxidos (bauxita) o sulfuros (de zinc, níquel, etc.). A veces se necesitan temperaturas por encima de los 100 °C, caso en que la lixiviación se efectúa a presión en reactores, como es el caso de la lixiviación de algunos sulfuros metálicos.

#### 6.6.1.6 AGITACIÓN.

Define el método de lixiviación dinámica y puede afectar, dentro de ciertos límites, los estados de difusión de reactivos. No debe afectar a los estados de adsorción de reactivos ni a la propia reacción química, pero sí puede influenciar la desorción de los productos insolubles formados sobre la superficie del mineral. Existe un cierto límite económico por encima del cual cualquier incremento en la agitación significa un costo innecesario y sólo puede contribuir a alcanzar más rápidamente el grado de lixiviación, pero no a mejorarlo. Este parámetro debe influenciar escasamente la extracción de una lixiviación estática respecto a una dinámica. Pero hay procesos en que se necesita una agitación más intensa, como en la lixiviación dinámica con

partículas gruesas, en que la agitación permite evitar la sedimentación, o la lixiviación con un gas como reactivo, para favorecer su transferencia al líquido de la pulpa.

#### 6.6.1.7 DENSIDAD DE LA PULPA.

Corresponde a la proporción de fases sólidas y líquidas, se puede expresar como gravedad específica, como relación líquido-sólido o como porcentaje de sólidos en peso. En procesos de lixiviación dinámica, siempre que sea posible, es preferible una alta densidad del 50% de sólidos aproximadamente (1:1, líquido-sólido), ya que permite la disminución del tamaño de los equipos de lixiviación (tanques agitadores) para un tiempo dado de retención, una mayor concentración de reactivos y menores pérdidas en la solución con el estéril. A su vez esta densidad está afectada por:

#### 6.6.1.8 CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL.

Los minerales de grano fino y contenidos de arcilla son muy viscosos, interfiriendo con la disolución de los reactivos, contactos con los sólidos y manipulación de la pulpa.

#### 6.6.1.9 CONDICIONES DE AGLOMERACIÓN Y CURADO

Cada una de las variables que influyen en el curado, repercuten en la lixiviación. Por ejemplo, a menor granulometría más rápida será la extracción del cobre en esta etapa. Como la fase 1 entrega las condiciones a las cuales debe efectuarse la aglomeración y el curado, éstas se mantienen constantes en la lixiviación.

#### 6.6.1.10 ALTURA DEL LECHO.

Está determinada por la permeabilidad del producto después del curado y por la velocidad en que se disuelve el metal de interés. Según esto, siempre es posible encontrar un óptimo de concentración de ácido inicial y flujo de alimentación para una altura dada, pero en realidad la altura del lecho tiene sus restricciones de carácter práctico y de inversión. Si se aumenta la altura, dejando constantes las demás variables de operación, el líquido que se desliza tiene un mayor tiempo de residencia dentro del reactor, por lo que tendrá mayor concentración de cobre instantáneo en la solución efluente,. Sin embargo, en contraposición a esto, aumentan las canalizaciones y compactaciones que restan eficiencia al proceso, además al trabajar con

alturas más grandes existe mayor posibilidad de disolver la ganga, repercutiendo en un mayor consumo de reactivo.

#### 6.6.1.11 FLUJO ESPECÍFICO.

Es la velocidad a la que se desplaza la solución lixiviante, a través de un lecho poroso no inundado, este se puede expresar en litros obtenidos por hora de tratamiento y por cada metro cuadrado (L/hm<sup>2</sup>). Este flujo depende de las cualidades fisicoquímicas del lecho aglomerado y está ligado con la concentración de ácido en la alimentación. Cuando el flujo aumenta, disminuye el tiempo de residencia en el reactor y el líquido deslizante tiene menor contacto con el líquido de los aglomerados, esto favorece si se piensa que se mantiene un gradiente de concentración entre ambas fases, lo que a su vez permite una buena transferencia de masa. Pero es negativo si se usan concentraciones de ácido muy altas, puesto que entrega como respuestas consumos de reactivos muy altos. Cuando el flujo disminuye, aumenta el tiempo de residencia en el reactor y el líquido deslizante tiene mayor tiempo de contacto con el líquido retenido por el lecho poroso; esto favorece si las concentraciones de ácido de la alimentación son altas, para mantener un pH que permita una transferencia másica sin mayores problemas.

#### 6.6.1.12 PRESENCIA DE AGENTES OXIDANTES.

Esta presencia provoca el aumento del potencial óxido reducción del sistema, que a su vez aumenta la disolución del cobre en la solución lixiviante.

#### 6.6.1.13 TIEMPO DE CONTACTO Y/O DE LIXIVIACIÓN.

Es un parámetro importante, ya que determina el tiempo necesario para extraer el metal o mineral en el porcentaje requerido, según las condiciones operativas establecidas. Queda determinado por la extracción que se desea y la cinética de la extracción.

#### 6.6.1.14 SELECCIÓN DE AGENTES LIXIVIANTES

Teniendo en cuenta las características del mineral, así como las reservas y el valor potencial del yacimiento, se selecciona el o los agentes lixiviantes más idóneos. Para ello se realizan diferentes caracterizaciones mineralógicas previas que permiten determinar los valores



iniciales para realizar posteriormente las pruebas de laboratorio de lixiviación en columnas unitarias.

#### 6.6.1.15 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL MINERAL

Comprende la determinación de las especies mineralógicas presentes en la ganga y el mineral, y las asociaciones entre las especies de minerales y ganga. La evaluación de la caracterización mineralógica determina tendencias esperadas del comportamiento en la lixiviación, lo que permite afianzar la ejecución de las pruebas o, por el contrario, descartar pruebas no aplicables. En estas pruebas se:

- Evalúa la consistencia de la roca y las especies que la afectan.
- Clasifican los tipos de minerales presentes en el material, sobre la base de criterios útiles desde los puntos de vista geológico, minero y metalúrgico.
- Profundiza el reconocimiento y tipificación de especies que puedan perturbar el proceso, como arcillas, y tipos de gangas, que aporten finos, coloides, impurezas o que impliquen consumo de ácido.
- Pondera un porcentaje de extracción esperado, basándose en las especies minerales presentes.

#### 6.6.1.16 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MINERAL

Incluye el análisis de las leyes de cabeza total y por fracción granulométrica, la definición de los contenidos de óxidos y sulfuros y la determinación de impurezas presentes. Los resultados que se obtienen orientan las pruebas de comportamiento metalúrgico, y mediante los análisis específicos, apoya la ejecución de esas pruebas con determinaciones para obtener, entre otras composiciones de ripios, evaluación de los efectos del proceso de aglomeración / curado y otras.

#### 6.6.1.17 PRUEBAS ESTÁNDAR DE CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL

Comprenden pruebas de extracción de cobre y consumo de ácido del mineral, con y sin curado previo, para comparar el efecto de ese proceso sobre su comportamiento metalúrgico.



### 6.6.1.18 PRUEBAS DE CONSUMO ESTÁNDAR DEL MINERAL

Se realizan por lixiviación agitada de una pequeña porción del mineral, molido a 100% -10 en contacto con abundante solución de ácido sulfúrico. En estas condiciones, define la máxima extracción de cobre posible y el consumo bruto de ácido.

### 6.6.1.19 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN A PH 2

Es básicamente similar a la prueba estándar, pero iniciada con sólo una fracción del consumo de ácido de la prueba estándar y redosificando el ácido hasta estabilizarlo en ese valor, por al menos dos horas. Si la ganga es razonablemente poco consumidora, esta prueba define aproximadamente las extracciones y consumos esperados en la lixiviación industrial, aplicada al mineral de la muestra, y se pueden transformar en una prueba rápida de comprobación de resultados y tendencias.

### 6.6.1.20 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE CURADO

Basándose en los resultados de consumo estándar de ácido, se estudian las curvas de dosificación de ácido al curado a varias granulometrías máximas de chancado. Se evalúa para cada granulometría la extracción obtenida, luego del curado con diferentes dosificaciones de ácido, a objeto de determinar las proporciones óptimas de cada caso. Se analizan además los porcentajes de extracción de cobre por fracción granulométrica, sólo para las muestras de las pruebas a varios tamaños máximos y tratadas con la dosificación óptima. Los resultados orientan la definición de los tamaños de chancados máximos, a partir de las cuales se nota un deterioro de los grados de las extracciones. Se determinan las dosificaciones de ácido en curado /aglomeración que producen una inmediata y máxima extracción de cobre, sin excesos de ácido residual, que afecten la concentración de la solución rica, desde el primer momento de riego. En la caracterización química de las muestras tratadas, reevalúan las extracciones y consumos de ácido estándar y a pH constante. Se definen las dosificaciones y se evalúan las extracciones por fracción granulométrica, para afinar las granulometrías máximas y las tasas de riego de tratamiento.

### 6.6.1.21 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS UNITARIAS

Con los resultados y valores obtenidos en las pruebas de caracterización, se diseñan las pruebas de lixiviación en columnas unitarias, que están diseñadas de manera que su diámetro



tiene estrecha relación con la necesidad de evitar "efectos de pared" de las granulometrías del ensayo. La información obtenida en estas pruebas permite definir los porcentajes de extracción de cobre, los consumos de ácido, las duraciones del ciclo y las correspondientes curvas que representan el proceso específico y que se espera que ocurran en la práctica. Mediante estas pruebas se pueden establecer las concentraciones de ácido del riego, los consumos esperados y costos marginales diarios que aconsejan la duración del ciclo; con esta información se definen las curvas corregidas de la cinética de extracción y de concentraciones de efluentes para las alturas de apilamiento y tasas de riego usadas. En las pruebas de columna se realizan los siguientes análisis:

- Se evalúa el porcentaje de extracción total del cobre, extrapolando a terreno, bajo las mismas condiciones establecidas en las pruebas y su comportamiento en el tiempo.
- Se determinan las características de las soluciones obtenidas durante la lixiviación, en términos de contenidos de cobre, ácido libre e impurezas, y se extrapola a la realidad bajo las mismas condiciones en que fueron hechas las pruebas.
- Se define el progreso del consumo de ácido versus tiempo y porcentaje de extracción, considerando valores económicos, para introducir este criterio en la determinación del ciclo de tratamiento.

Los resultados de las pruebas de columna, permiten tomar decisiones respecto del proceso que se lleva en terreno como:

- Redefinir y balancear los consumos de ácido, de manera de mantener un equilibrio en el sistema.
- Definir la validez y conveniencia de la tasa de riego adoptada.
- Evaluar las concentraciones promedio de cobre de los efluentes, asociadas a los ciclos de riego utilizados y a los porcentajes de extracción obtenidos. Esta información permite aproximar una definición del circuito de las soluciones, de las alturas máximas de apilamiento y del factor de apilamiento (TMS/m<sup>2</sup>).
- Las metodologías operacionales a implementar para mantener el control de la concentración de cobre y ácido de las soluciones efluentes.
- Determinar desde el punto de vista técnico, los tamaños favorables de chancado, de acuerdo con los porcentajes de extracción por fracción granulométrica. Esta aproximación, se debe contrastar económicamente, teniendo como referencia los

porcentajes de extracción máximos y las cinéticas de extracción obtenidas a los diversos tamaños ensayados.

El ideal sería elegir un solo agente químico, que sea económico y recuperable, y un ciclo de lixiviación lo más corto posible (ojalá uno solo), para extraer un máximo de cobre y un mínimo de impurezas, lo cual es difícil en la mayoría de los casos. En la elección del proceso es fundamental conocer la cinética de la reacción química que las influyen, mediante las diversas fases de investigación en laboratorio. Para ello se hacen análisis preliminares en botellas rotatorias y en columnas o vasijas, según si el mineral es apto a la lixiviación estática o dinámica.

Por último, al seleccionar previamente el agente lixivante se debe considerar el proceso posterior de recuperación del cobre a partir de la solución madre. Así, por ejemplo, si el lixivante es el sulfato férrico, deben tenerse en cuenta los efectos perjudiciales del aumento de iones férricos en la solución, para un posterior proceso de cementación (alto consumo de chatarra) o electrodeposición (mala eficiencia de corriente en electrólisis) o extracción por disolventes (purificación de hierro). En la lixiviación de minerales de cobre, los reactivos normales suelen ser para los minerales oxidados el ácido sulfúrico y sulfato férrico acidificado (sulfuros), en medio oxidante. Se distinguen dos casos:

- Lixivante natural, producido por las aguas de lluvia que percolan en el yacimiento, atacando las superficies expuestas y produciendo un lixivante con contenidos variables de ácido, hierro e incluso cobre, según la estación del año y zonas de producción. Son las aguas de desagüe de minas. Puede ocurrir que, mezclando aguas de distintas procedencias con sulfato férrico suficiente, se controla tan sólo el pH bajo (añadiendo ácido sulfúrico), para regular la acidez e impedir la precipitación del hierro trivalente a hidróxido, que origina bastantes dificultades en la lixiviación. En caso de escasez de agua, se recircula parte de la solución estéril o se aportan aguas más frescas de otras procedencias.
- Lixivante preparado. Se emplea el hierro trivalente en forma de sal ácida (sulfato férrico), cuya concentración en  $Fe^{3+}$  y ácido se ajusta según la investigación y experiencia práctica. Normalmente, las soluciones empleadas no suelen ser muy concentradas. El ácido varía entre 4 y 10 % y el hierro, alrededor del 1%. En algunos casos hay una regeneración del lixivante en el propio proceso. Las soluciones estériles se recirculan o rechazan, con o sin depuración. La recirculación conlleva un aumento

de compuestos tales como hierro, sulfatos, arsénico, cloro, ácidos, etc. Este aumento, sobre todo en sustancias nocivas como el As, Cl, ácidos, etc., puede ser perjudicial al proceso en sí o en estados posteriores, por lo que debe efectuarse una depuración o sangrías, periódicamente.

## 6.6.2 CONCENTRACIÓN Y DOSIFICACIÓN INICIAL DE ÁCIDO SULFÚRICO

La concentración de ácido sulfúrico es la que otorga la capacidad de carga a la solución lixivante. A mayor concentración de ácido sulfúrico, menor es el pH y mayor es la disolución del sulfato de cobre remanente. Este ácido inyectado en la alimentación, se va consumiendo en el recorrido a través del reactor, debido a las reacciones químicas que tienen lugar tanto con la ganga como con restos de cobre que no reaccionaron en la etapa de curado, lo que va provocando un aumento en el pH. El aumento del pH provoca a su vez la precipitación de sales que obstaculizan la difusión del cobre a través de los poros, haciendo además que la solución vaya perdiendo la capacidad de carga. La dosificación de ácido en esta etapa queda determinada por la combinación óptima del flujo y la concentración alimentada. Una variante frecuente consiste en reemplazar el agua y parte del ácido, por soluciones pobres del proceso de refinación de la planta de extracción por solventes y/o la sangría de electrolito de la electrodeposición. En estos casos debe cuidarse de evitar que restos de orgánico, atrapado por arrastre en el SX, ingresen al tambor, ya que suele degradarse con el ácido concentrado y termina por contaminar todo el circuito de SX. Evitar este efecto no deseado se logra pasando las soluciones pobres por una columna de carbón activado, antes de ingresar al tambor. Esta secuencia combinada de operación, en que la lixiviación en pilas, usando riego no inundado, se realiza sobre un mineral finamente chancado, aglomerado con agua y curado con ácido concentrado, se conoce como Proceso de Lixiviación TL y su uso se ha generalizado para el tratamiento de minerales de cobre sean oxidados o sulfurados. La primera operación comercial usando este proceso fue la mina de Lo Aguirre, de Minera Pudahuel, que operó desde 1980 a 2000. Entre los agentes lixiviantes en la minería del cobre se cuentan agentes lixiviantes ácidos y básicos.

### 6.6.2.1 AGENTES LIXIVIANTE ÁCIDOS Y BÁSICOS EN LA LIXIVIACIÓN

Los agentes lixiviantes pueden ser ácidos o básicos. Entre los agentes ácidos se cuenta principalmente el ácido sulfúrico y los sulfatos y entre los agentes básicos se pueden nombrar el Amoníaco y aminas, la soda cáustica y sulfuros y el cianuro.





### 6.6.2.2 ÁCIDO SULFÚRICO

El ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) es el reactivo ácido universal por excelencia, debido a su disponibilidad y su bajo costo en el mercado. De gran importancia industrial, en minería química se emplea principalmente en la lixiviación de minerales de cobre (carbonatos y óxidos) y de minerales de uranio. A temperatura ambiente es un líquido incoloro, oleaginoso y denso; el ácido concentrado tiene densidad de 1,85 g/cc y contiene 96% en peso de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Fácilmente soluble en agua con gran desprendimiento de calor. Se comporta como un ácido fuerte, debido a su disociación en:



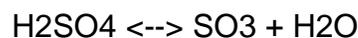
Por consiguiente una disolución de ácido sulfúrico presenta una elevada concentración de iones H<sup>+</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, los que caracterizan sus principales propiedades:

### 6.6.2.3 PROPIEDADES ÁCIDAS.

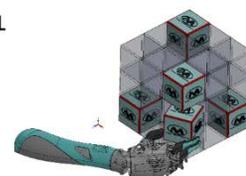
Son debidas a la gran concentración de iones H<sup>+</sup> que proporciona. Por esta razón este ácido se emplea como neutralizador y para la destrucción de complejos alcalinos, cianurazos, aminitos, hidroxílicos, etc. y en la disolución de metales. Por otro lado, la presencia de iones H<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> da lugar a la acción precipitante de sales ácidas MHSO<sub>4</sub> (sulfatos ácidos o bisulfatos) y sales neutras M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sulfatos).

### 6.6.2.4 PROPIEDADES OXIDANTES.

Se deben a la presencia de SO<sub>3</sub>, en equilibrio con el mismo ácido y agua, según la reacción.



Este equilibrio se desplaza hacia la derecha al aumentar la temperatura y por eliminación de agua. El poder oxidante disminuye con la dilución por la formación de iones bisulfato y sulfato. El poder oxidante de los componentes posibles en el ácido sulfúrico concentrado y sus disoluciones acuosas, disminuyen en el orden:



Por ello, las soluciones muy diluidas de ácido sulfúrico tienen propiedades oxidantes muy débiles, comparadas con las del ácido concentrado puro. Asimismo, los sulfatos son menos oxidados que el ácido. El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado disuelve metales menos reductores que el hidrógeno (Cu, Hg, Ag, etc.), con desprendimiento SO<sub>2</sub> y formación de sulfato. El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido disuelve los metales más reductores que el hidrógeno (Fe, Zn, Al, etc.), con desprendimiento de H<sub>2</sub> y formación de sulfato.

### 6.6.2.5 PROPIEDADES DESHIDRATANTES.

Se deben a la baja presión de vapor de agua del ácido sulfúrico concentrado y al elevado calor de dilución. A 88% de concentración, la presión de vapor es de tan solo 1 mm de Hg y a 60%, de 3 mm de Hg. Con el ácido, en un recipiente cerrado, se puede obtener una atmósfera muy seca y por ello se emplea como desecador. Debido a sus propiedades fuertemente ácidas y oxidantes, el ácido sulfúrico es corrosivo, sobre todo a altas temperaturas, pero lo es menos que otros reactivos ácidos y oxidantes como el cloro y cloruros. Su empleo, sobre todo en minería química, se realiza normalmente en soluciones diluidas que varían entre el 5 y el 10% en peso. Para elegir la concentración, es necesario buscar el equilibrio de ciertos factores y, aparte del consumo en la cinética de las reacciones, se requiere un mínimo de ácido libre para mantener solubilizados los productos formados. Los consumos varían según la reacción y cantidad de metal o mineral a disolver. Partiendo de cantidades estequiométricas, los consumos reales son siempre superiores. Algunas menas contienen tal cantidad de ganga alcalina (carbonatos, que el consumo por neutralización puede exceder los límites de rentabilidad del proceso. El empleo de ácido sulfúrico en minería química es imprescindible actualmente en la lixiviación de minerales de cobre, solo o con la ayuda de oxidantes, como oxígeno y sulfato férrico.

### 6.6.3 SULFATOS

Las características de los sulfatos vienen determinadas por el catión. A continuación se describen los tipos de sulfatos

#### 6.6.3.1 SULFATOS ALCALINOS

son muy estables, cristalizando con agua los cationes más pequeños (Li y Na). Un ejemplo típico es la sal de Glauber (glauberita), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O. Los restantes sulfatos alcalinos





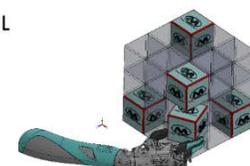
cristalizan anhidros, siendo el más importante el sulfato potásico  $K_2SO_4$ , que es relativamente poco soluble.

### 6.6.3.2 SULFATOS ALCALINOS-TÉRREOS

de ellos, el sulfato magnésico  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , muy soluble en agua, siendo un producto natural (epsomita). Forma también una sal doble  $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 12H_2O$ .

Los restantes sulfatos alcalino-térreos son muy poco solubles; sólo es sulfato de calcio  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (yeso natural), que por calentamiento a baja temperatura pierde parte del agua de cristalización, convirtiéndose en semihidratado ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ), que es el constituyente del yeso de la construcción; al recuperar las moléculas de agua se endurece, fraguando. A más alta temperatura el yeso se calcina a muerte (anhidrita) y no recupera el agua. El agente lixiviante más usado para minerales oxidados es el ácido sulfúrico, por lo que las soluciones que entran a electroobtención son de  $CuSO_4 \cdot H_2SO_4$  más impurezas, de modo que fundamentalmente se tienen iones de  $Cu^{+2}$ ,  $H^+$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $SO_3^{+2}$ . La elección del agente químico de lixiviación va a depender de su costo, disponibilidad, estabilidad química, selectividad y grado de generación de soluciones ricas en mineral, de tal forma que sea lo más económico y fácil de trabajar. En la siguiente tabla se presentan los agentes de lixiviación más utilizados.

Tipo de agente	Ejemplos
■ Ácidos inorgánicos	ácido sulfúrico ácido clorhídrico ácido nítrico
■ Bases	hidróxido de amonio
■ Agentes	oxidantes oxígeno ión férrico ión cúprico
■ Agentes acomplejantes	amoníaco sales de amonio cianuros carbonatos cloruros



En general, los minerales de cobre requieren una oxidación previa para la posterior disolución del metal. En el caso de los carbonatos y óxidos de cobre sólo se requerirá un disolvente, normalmente ácido sulfúrico, y en el caso de los sulfuros, un oxidante, cuya fuerza de oxidación dependerá del tipo de sulfuro. Al considerar el agente lixivante, que suele constituir un costo importante del proceso, hay que tener en cuenta su disponibilidad (transporte), precio en planta, consumo y posibilidad de recuperación. Igualmente las características corrosivas, por su influencia en los materiales de la planta industrial. Sin embargo, el aspecto más importante es que el agente lixivante tiene que ser efectivo y lo más selectivo posible, para la disolución del cobre del mineral a tratar. Las diferencias de las características de las menas son tan amplias, incluso dentro de una misma zona, que los principios químicos establecidos sólo pueden servir de guía para la selección del lixivante.

## IMPORTANTE

Al momento de elegir el agente lixivante es importante tener en cuenta la composición mineralógica del material, tipo de ganga, tamaños de granos y diseminación, contenido de azufre, presencia de carbonato, cloruros u otros constituyentes. Por lo que es necesaria la investigación y la experiencia operativa, para seleccionar el lixivante y obtener los datos necesarios para predecir el comportamiento de la lixiviación.

### 6.6.4 APLICACIÓN DE LA SOLUCIÓN LIXIVIANTE

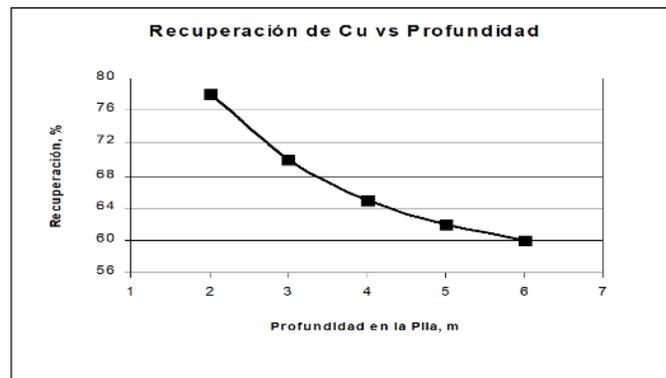
La lixiviación propiamente tal se inicia con el riego por aspersión o goteo. Los distintos sistemas de irrigación, de aplicación de la solución, velocidades y efectos de la operación de lixiviación en vertederos, se pueden aplicar al sistema de lixiviación en pilas, donde existe un mayor control de la operación, con lo que se obtienen mejores resultados. Para el logro de un resultado exitoso, es fundamental cuidar la distribución de la solución lixivante a la mayor área que sea posible, mediante un sistema de aspersión, y con la velocidad de aplicación conveniente según la adaptación (permeabilidad) de la pila. Si la solución lixivante se entrega de manera de aumentar la cantidad de líquido disponible en torno ellas, se trata de un sistema de riego no inundado o trickle-leaching, en el que al excederse los límites de líquido correspondiente al estado capilar, se produce una suspensión sólido/líquido. En ese momento ya no hay fuerzas para mantener las partículas en su sitio, los finos se desplazan, ocupando espacios entre las partículas mayores y, si hay arcillas, ambos factores cumplen un rol

sellante, lo que conduce a un lecho inundado. Debe evitarse esta situación, ya que para una buena operación es esencial mantener una adecuada permeabilidad.

### 6.6.5 LIXIVIACION BACTERIANA DE MINERALES DE COBRE

Desde la década de los 60, cuando se concretó la primera aplicación industrial exitosa de la lixiviación bacteriana para el tratamiento de los minerales de cobre de baja ley en botaderos (dump leaching), esta tecnología ha jugado un rol cada vez más importante en la industria minera del cobre. La lixiviación bacteriana en botaderos permitió recuperar el cobre desde materiales de descarte que no podían ser tratados económicamente con las tecnologías convencionales.

Con los criterios actuales de diseño y operación con esta tecnología es posible recuperar desde estos minerales entre el 75 y 95% del cobre contenido en períodos de lixiviación. En el actual estado de desarrollo, la aplicación económica de esta tecnología está restringida a minerales de cobre secundarios, es decir aquellos en que predominan las especies minerales calcosina, covelina y bornita, cuyas velocidades de lixiviación son suficientemente rápidas en condiciones ambientales. En este tipo de minerales ofrece una alternativa de tratamiento más económica y menos contaminante que el proceso convencional de concentración-fusión. Sin embargo, la gran limitación de la biolixiviación en pilas es que la tecnología actual nos es aplicable para tratar económicamente minerales ricos en calcopirita, un mineral muy refractario a la lixiviación en condiciones ambientales y que es constituyente mayoritario en los minerales sulfurados de cobre.



Perfil de recuperación de cobre a lo alto del lecho mineral en una pila biolixiviada.

De estudios en reactores agitados con concentrados de calcopirita, se sabe que este mineral puede ser lixiviado en forma mucho más eficiente bajo la acción catalítica de microorganismos

termófilos que operan a temperaturas del orden de 60-80°C. Por lo tanto, es interesante explorar la factibilidad de operar las pilas de biolixiviación en condiciones de operación tales que permitan activar el desarrollo de este tipo de microorganismos. Finalmente hay que señalar que la biolixiviación, siendo un proceso que incorpora aspectos biotecnológicos, requiere de incluir en su diseño y operación los criterios conceptuales de la bioquímica y la microbiología.

### 6.6.5.1 FUNDAMENTOS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

La recuperación de cobre desde un mineral sulfurado por la vía hidrometalúrgica requiere de la disolución de las especies sulfuradas de cobre contenidas en el mineral. Para lograr esto es necesario lixiviar el mineral en ambiente ácido y en presencia de un agente oxidante, el cual al reducirse capta electrones desde el mineral y posibilita así el rompimiento de su estructura. La disolución de los sulfuros minerales en condiciones ambientales es termodinámicamente posible en la presencia del oxígeno del aire. La utilización del oxígeno, que es un reactivo con alto potencial oxidativo pero cinéticamente no muy efectivo en condiciones ambientales, se concretiza indirectamente mediante la incorporación del par redox intermedio Fe<sup>+3</sup>/Fe<sup>+2</sup> presente en las soluciones lixiviantes. De este modo el proceso involucra el siguiente ciclo de reacciones:

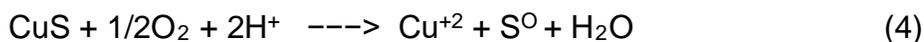
- en una primera etapa se requiere que el oxígeno se disuelva en la solución lixiviante:  

$$O_2(\text{aire}) \text{ ---> } O_2(\text{solución}) \quad (1)$$
- El oxígeno en solución oxida al ión ferroso disuelto de acuerdo a la reacción:  

$$1/2O_2 (\text{sol}) + 2 Fe^{+2} + 2 H^+ \text{ ---> } 2Fe^{+3} + H_2O \quad (2)$$
- El ión férrico lixivia químicamente a los sulfuros de cobre presentes, que se pueden tipificar aquí en el CuS, de acuerdo a la reacción:  

$$2Fe^{+3} + CuS \text{ ---> } 2Fe^{+2} + Cu^{+2} + S^0 \quad (3)$$

De estas reacciones se ve que el hierro es un portador de carga intermedio que es continuamente oxidado y reducido, de modo que la reacción global neta es:



La lixiviación de sulfuros minerales en base a la cadena de reacciones (1– 4) ocurre espontáneamente en soluciones ácidas aeradas, pero la velocidad de disolución del mineral

en soluciones abióticas es muy lenta como para ser de interés comercial. Sin embargo, la velocidad de lixiviación del mineral es fuertemente catalizada en la presencia de ciertos microorganismos lixiviantes acidófilos, es decir que son activos y crecen en medio ácido, y autótrofos, es decir para crecer utilizan carbón proveniente del CO<sub>2</sub> del aire. En la Tabla 1 se incluye una lista de los principales microorganismos utilizados detallando el rango de temperatura y acidez en que operan y los sustratos que utilizan.

**Tabla 1. – Características de los principales microorganismos lixiviantes.**

Microorganismos	Temp . [°C]	pH	Substrato					Fuente de carbono	
			Fe <sup>+2</sup>	S <sup>0</sup>	FeS <sub>2</sub>	CuFeS <sub>2</sub>	S <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	Levadura
<i>Acidithiobacillus Ferrooxidans</i>	10-30	1.4-3.5	+	+	+	+	+	+	-
<i>Thiobacillus Thiooxidans</i>	10-40	1.3-4.5	-	+	-/+	-/+	+	+	-
<i>Leptospirillum Ferrooxidans</i>	10-35	1.3-3.5	+	-	+	-/+	-	+	-
<i>S. thermosulfoxidans</i>	40-50		+	+	+	+	-	+	+
<i>Sulfolobus BC</i>	70-90	1.6-2.5	+	+	+	+	+	+	+

Los microorganismos lixiviantes catalizan de manera particularmente eficiente la oxidación del ión ferroso (reacción 2), aumentando su velocidad del orden 10<sup>6</sup> veces en relación con el sistema abiótico. Con este mecanismo de catálisis los microorganismos permiten mantener una adecuada tasa de regeneración del ión férrico, ion que eficientemente disuelve a los sulfuros minerales (reacción 3). Muchos microorganismos también catalizan la oxidación bacteriana del azufre residual producido en la lixiviación de los sulfuros de cobre (reacción 3), según la reacción:



Resumiendo, los atractivos principales del proceso de lixiviación bacteriana son los siguientes:

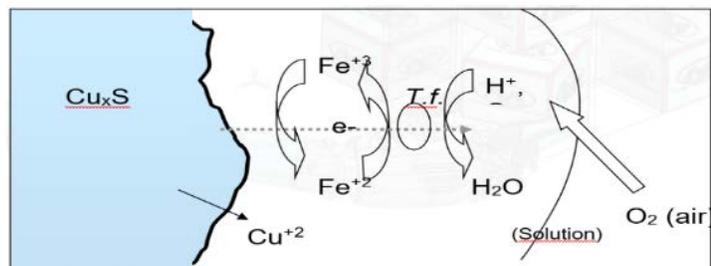
- El proceso de catálisis bacteriana posibilita lixiviar eficientemente los sulfuros minerales en condiciones de presión y temperaturas ambientales, en base a la utilización del oxígeno, el oxidante más económico y de mayor disponibilidad.
- Durante la lixiviación se puede generar una fracción importante del ácido y el calor requerido en el proceso.
- Los microorganismos que catalizan el proceso de lixiviación crecen y se regeneran simultáneamente durante sobre la base de la utilización de una fuente de carbón económica e inagotable, como es el dióxido de carbono del aire. Se evita así el costo y las complejidades involucradas en la utilización de fuentes de carbono orgánicas como

es usual en los procesos biotecnológicos con organismos heterótrofos.

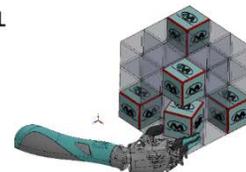
### 6.6.5.2 FACTORES DE CONTROL

**El éxito económico de una operación de biolixiviación es muy dependiente de la velocidad con que se lixivia el cobre desde el mineral.** Si la velocidad de lixiviación aumenta, menor es el tiempo de lixiviación necesario para alcanzar la recuperación objetivo, disminuyendo el tamaño de la pila o reactor requerido (la inversión) y los costos de operación. La velocidad de lixiviación del cobre es el resultado de la cinética de fenómenos metalúrgicos y microbiológicos que interactúan íntimamente. El esquema de reacción en la Figura 1 muestra que la disolución de un sulfuro involucra una cadena para transferir electrones desde el sulfuro vía oxidación reducción del par  $Fe^{+2}/Fe^{+3}$  hasta el oxígeno disuelto, elemento que actúa como aceptor final de electrones.

En algunas situaciones la velocidad de transferencia de electrones, es decir de disolución de cobre, está controlada por la velocidad de oxidación bacteriana del ión ferroso que provee el oxidante para la lixiviación. Esta situación se produce usualmente cuando hay una baja población bacteriana y/o la actividad oxidativa de ésta está inhibida por operar fuera del rango de temperatura, pH o concentración de iones adecuado para los microorganismos. En este caso se habla de tener un proceso controlado por factores microbiológicos. En otras situaciones la transferencia de electrones está controlada por la velocidad de la lixiviación férrica del sulfuro. Esta situación se produce usualmente cuando, siendo la actividad bacteriana adecuada, el mineral ya está pasivado por la formación de azufre residual o la precipitación superficial de jarositas. En este caso se dice que el proceso está controlado por la cinética intrínseca de disolución del mineral. En otros caso, sin embargo, hay zonas del lecho de una pila como la esquematizada en Figura 1, en donde no hay un adecuado suministro de oxígeno (mala aireación) o de solución (mala irrigación). En el primer caso la velocidad de lixiviación estará controlada directamente por la llegada de oxígeno a esa zona; en el segundo caso, si la zona en cuestión está muy poco humedecida es probable que la lixiviación esté controlada por la difusión de protones y/o iones metálicos desde y hacia esa zona del lecho. Si la zona está seca, está claro, no hay lixiviación.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



## Cadena de transporte de electrones involucrada en la biolixiviación de un sulfuro en presencia de iones $Fe^{+2}$ , $Fe^{+3}$ y oxígeno

La lixiviación bacteriana es un proceso hidrometalúrgico cuya ocurrencia se sustenta en la acción catalítica de ciertos microorganismos. Desde esta perspectiva, el proceso es también un proceso biotecnológico, o como se refiere usualmente, un proceso biohidrometalúrgico. Por este motivo su operación es más compleja que el proceso de lixiviación química, ya que para su funcionamiento eficiente se deben satisfacer simultáneamente las condiciones para un adecuado desarrollo de la actividad bacteriana y, en consecuencia, una adecuada utilización de su poder catalítico. Los microorganismos actualmente utilizados en las faenas de lixiviación en pilas, botaderos o reactores son activos sólo en cierto rango de acidez y en un cierto rango de temperatura (ver Tabla 1). Además, para su adecuado desarrollo los microorganismos requieren del suministro de nutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes pueden ser incorporados naturalmente en las mismas soluciones de lixiviación debido a la disolución de elementos de la ganga del mineral, como es el caso de la lixiviación en pilas. Sin embargo, en el caso de la biolixiviación en reactores en que se tratan concentrados de los cuales se ha removido parte importante de la ganga y en donde se opera con muy altas concentraciones de microorganismos, los nutrientes deben ser agregados suplementariamente al proceso. La actividad de los microorganismos puede ser también inhibida si la concentración de ciertos iones tóxicos sobrepasa los límites críticos respectivos, o la fuerza iónica de la solución es muy alta.

### 6.6.5.3 LIX BACTERIANA DE MINERALES DE COBRE EN PILAS.

La lixiviación bacteriana en pilas, combinada con SX y EW, es un proceso ya establecido a nivel industrial para obtener cátodos de cobre a partir del tratamiento de minerales sulfurados de cobre secundarios. Después, de la primera aplicación a los minerales mixtos y sulfurados de Lo Aguirre en 1980, ha habido un constante incremento en el número de proyectos basados en esta tecnología, principalmente Chile y Australia, los cuales se resumen en la Tabla 2. El proceso de biolixiviación en pilas es muy flexible en cuanto a la escala de producción. Se tienen plantas BioLIX-SX-EW con grandes producciones, en el orden de 100.000 ton/año de cátodos, o de pequeña escala, 10.000 ton/año de cátodos, todas las cuales operan rentablemente. La altura de las pilas es usualmente entre 6 y 8 metros. El mineral es previamente chancado a  $-1/2"$  ó  $-3/8"$ . En la práctica más convencional el mineral es previamente curado con ácido y aglomerado en tambores de modo de producir un lecho de buena permeabilidad gaseosa y mejorar la distribución de solución percolante. Una alternativa también usada es la previa remoción de los finos del mineral chancado, los que se derivan a procesos alternativos. Las pilas se irrigan por goteo y/o aspersion con solución ácida recirculada desde SX, con flujos de 10 a 30 lt/hr por metro cuadrado. Los períodos de irrigación son combinados con períodos de reposo (irrigación detenida), variando la duración de ambos

según la planta. La solución cargada con cobre se recolecta en tubos y/o carpetas recolectoras posicionadas adecuadamente en la zona inferior de la pila. La fracción más importante de la población bacteriana se encuentra retenida en el lecho de mineral, ya sea adherida a la superficie de las partículas o presente en la solución intersticial retenida capilarmente en los aglomerados.

**Tabla 2. Plantas de biolixiviación de minerales de cobre en pilas**

Planta y ubicación	Tamaño: Ton mineral/día	Años de operación
Lo Aguirre, Chile	16.000	1980 – 1996
Gunpowder's Mammoth Mine, Australia	In-situ <sup>a</sup>	1991 – operando
Mt. Leyson, Australia	1.370	1992 - 1997
Cerro Colorado, Chile	16.000	1993 – operando
Girilambone, Australia	2.000	1993 – en cierre
Ivan-Zar, Chile	1.500	1994 – operando
Quebrada Blanca, Chile	17.300	1994 – operando
Andacollo, Chile	10.000	1996 – operando
Dos Amigos, Chile	3.000	1996 – operando
Cerro Verde, Perú	32.000	1996 – operando
Zaldívar, Chile	20.000	1998 – operando
S&K Koper, Myanmar	18.000	1998 – operando
Equatorial Tonopah, USA	24.500	2000 - 2001

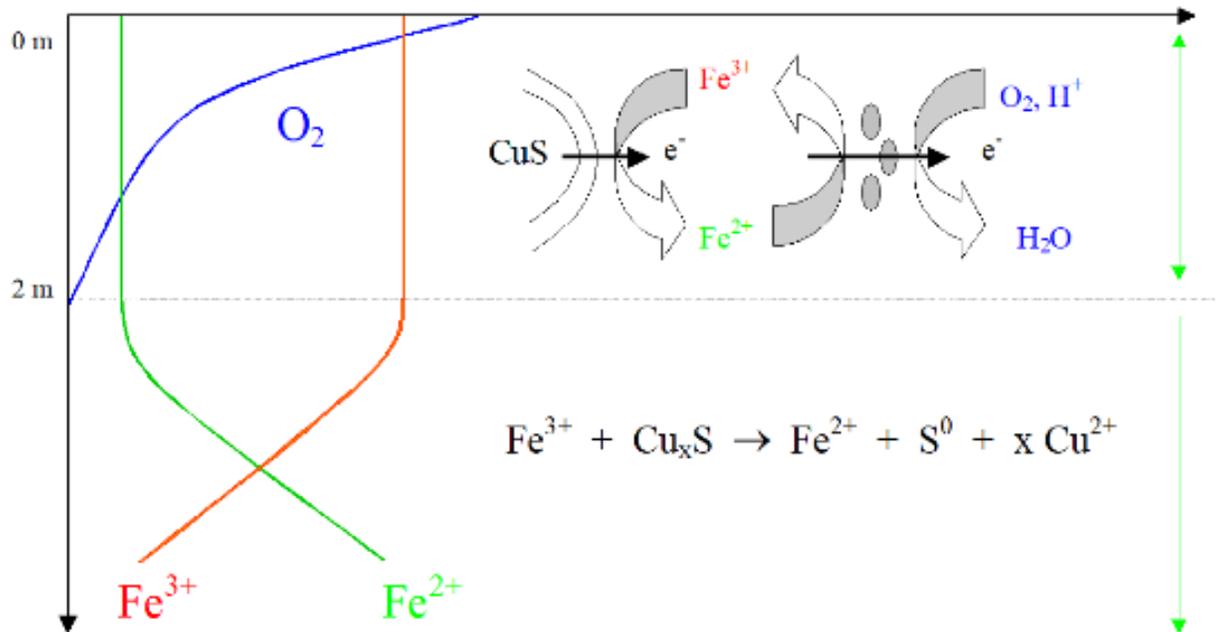
<sup>a</sup> mineral de 1.2 millones de toneladas

#### 6.6.5.4 AEREACIÓN

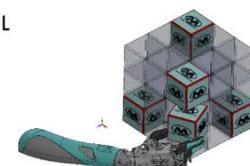
Para que una pila opere eficientemente en el lecho de mineral deben estar presentes las 3 fases: sólido (el mineral), líquido (la solución lixivante), y gas (el aire). Solo de este modo se tiene una adecuada área de interface gas/líquido para la transferencia de oxígeno a la solución y la eficiente oxidación del ión ferroso en presencia bacterias. Está claro que el inadecuado suministro de aire o solución en alguna zona del lecho imposibilita el proceso de lixiviación localmente y contribuye a disminuir la eficiencia del proceso. En las primeras operaciones de lixiviación bacteriana en pilas se operó utilizando solo aereación natural. En este caso el suministro de oxígeno al seno del lecho mineral debería ocurrir por los siguientes mecanismos principales: a) convección natural ascendente en los taludes de la pila; b) convección natural ascendente en la base de la pila desde los tubos recolectores de solución ubicados en la base de la pila; c) difusión de oxígeno desde la superficie superior de la pila. En la práctica se observó que la convección de aire desde la base se vió inhibida por la formación de una zona de saturación de líquido en la base de las pilas que baja fuertemente la permeabilidad gaseosa

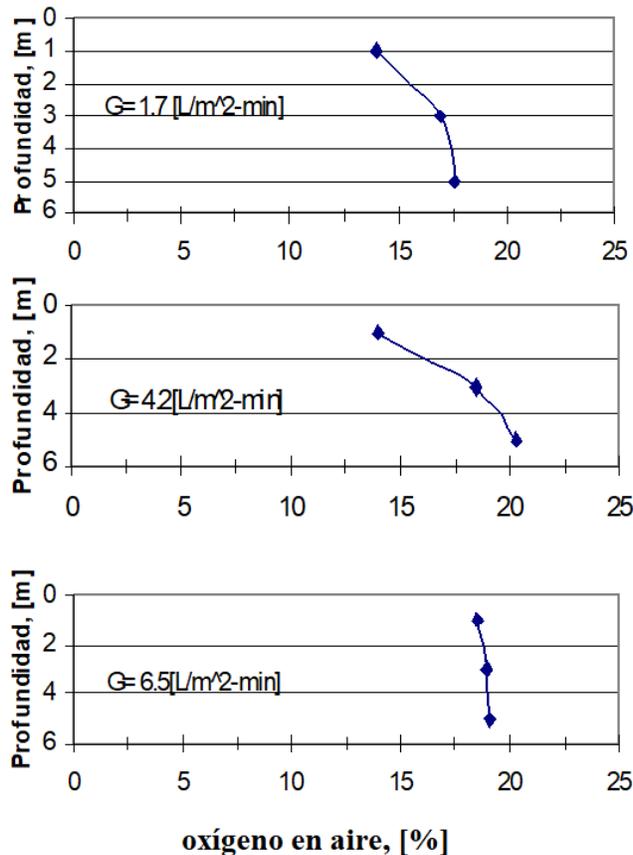
del lecho. Por otra parte, la convección por los taludes sólo beneficia a la zona de mineral cercano a estas superficies, lo que considerando las grandes dimensiones de las pilas industriales, sólo representa una muy pequeña fracción del mineral total acumulado en la pila. De este modo, se tiene entonces que usando convección natural la principal fuente de oxígeno es producto de la difusión de este elemento desde la superficie superior del lecho de la pila (aunque una fracción de oxígeno también entra como aire arrastrado por la solución de irrigación). De este modo la pila presenta una zona superior del lecho bien aireada en donde se centra la población y actividad oxidativa bacteriana. La parte inferior del lecho, no oxigenada, se lixivia fundamentalmente en base de la lixiviación química con el ión férrico generado en la zona superior aireada (ver esquema en Figura 2). Este esquema de lecho zonalizado hace que la concentración de hierro disuelto sea muy crítica, siendo necesario operar con concentraciones sobre 7 g/l, ya que el grado de avance del frente de reacción hacia la zona inferior del lecho crece con el aumento de su concentración.

Considerando la deficiente zonificación de la aereación obtenida al usar convección natural, se introdujo el soplado de aire con ventiladores a través de ductos auxiliares insertados en la base del lecho, por sobre la zona de saturación. La empresa Girilambone (Australia) fue la primera en reportar esta innovación, la que resultó en aumentos notables en la velocidad de lixiviación y recuperación final de cobre. Este aumento se debe a la mejor distribución de oxígeno y de población bacteriana al interior del lecho de mineral que se obtiene con esta metodología (ver Figuras 3 y 4).



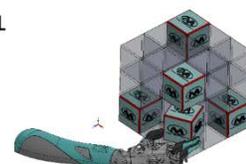
*Zonas de reacción producidas en pilas de biolixiviación aeradas por convección natural.*

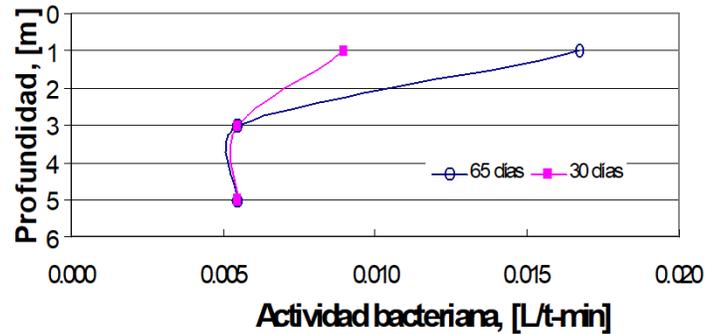




Concentración de oxígeno en el interior de una pila de lixiviación operando con diferentes flujos de aire en la base del lecho.

Cuando hay una adecuada concentración de oxígeno y población de bacterias al interior del lecho el requerimiento de concentración de hierro en la solución lixivante es menor, ya que el ion férrico es continuamente regenerado en zonas cercanas al sulfuro y su difusión no es factor controlante de la cinética de lixiviación de cobre. Se estima que en estas condiciones se puede operar eficientemente con concentraciones de hierro de 1 a 2 g/l. Es importante señalar que desde el punto de vista operacional es difícil obtener una buena distribución de oxígeno a lo ancho del lecho de mineral, ya que los orificios de los tubos sopladores tienden a obstruirse durante la operación. Sin embarfo, se han propuesto diversas mejoras técnicas para subsanar esta dificultad que están actualmente en proceso de evaluación en planta.





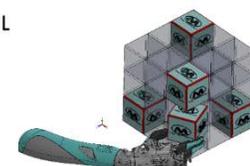
Distribución de población de bacterias en el interior del lecho de una pila operando con soplado en base del lecho. La población está cuantificada en cuanto a la capacidad de consumo de oxígeno de la población presente en 1 Ton de mineral.

### 6.6.5.5 OPTIMIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD OXIDATIVA BACTERIANA

Para tener un impacto adecuado de la catálisis bacteriana la población bacteriana debe ser suficientemente grande y activa como para mantener el hierro disuelto como ión férrico. Poblaciones del orden de  $10^8$ - $10^9$  bacterias/kg mineral se consideran usualmente valores adecuados. Sin embargo, se ha observado que en la práctica operacional se puede obtener valores mucho menores, lo que indica que no se han creado condiciones para un adecuado poblamiento del mineral. A este respecto hay que considerar que el proceso inicial de curado, en que el mineral es expuesto momentáneamente a concentraciones de ácido del orden de 50 g/l puede tener un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de cualquier microflora inicialmente presente en el mineral. Una vez que el mineral está en la pila es en parte colonizado por las bacterias presentes en la solución lixivante recirculante, acumuladas en los ciclos anteriores. Sin embargo, este proceso puede ser lento ya que la población sobrenadante recirculante es fuertemente reducida al paso de la solución por SX. En algunos casos es recomendable evaluar la inoculación adicional del lecho, la que se puede efectuar mediante la irrigación de soluciones bacteriales crecidas en reactores ad-hoc o incorporando en el lecho del mineral una fracción de los rípios ya lixiviados, poblados con bacterias. En las plantas de biolixiviación las soluciones lixiviantes circulan en circuito cerrado entre las pilas y SX, siendo el único drenaje la solución retirada como humedad contenida en los rípios lixiviados retirados del circuito (aproximadamente 120 lt/ton mineral). Este tipo de operación resulta en el aumento de la fuerza iónica de la solución por acumulación de iones provenientes de la disolución de la ganga del mineral. El anión mayoritario es el ión sulfato ( $SO_4^{=}$ ) y los cationes mayoritarios son usualmente aluminio, hierro, magnesio, manganeso, etc. Se ha comprobado que la actividad oxidativa bacteriana comienza a ser parcialmente inhibida cuando las soluciones de sulfato están por sobre 50 g/l. La inhibición es prácticamente completa si la concentración de este ión sobrepasa los 100 g/l. La concentración estacionaria de ión sulfato está determinada directamente por el agregado de ácido al sistema, en particular el incorporado en la etapa de



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



curado. Del balance global del circuito se puede estimar, por ejemplo, que si en el curado se agregan sólo 10 kg ácido/ton mineral, la concentración estacionaria de sulfato en el circuito puede alcanzar a 84 g/l. De este ejemplo se deduce la importancia de revisar las necesidades de ácido en el curado, ya que el agregado indiscriminado de este reactivo en esta etapa puede resultar en una sub utilización del poder catalítico de los microorganismos lixiviantes en el proceso.

#### 6.6.5.6 CONTROL DE LA TEMPERATURA

La actividad oxidativa de los microorganismos lixiviantes es fuertemente influenciada por la temperatura. Por ejemplo, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* crecen de manera óptima a 20 – 25 °C y se sabe que su actividad decae prácticamente un 50% por cada 7 °C de caída de la temperatura. La temperatura dentro de una pila está generalmente determinada por los siguientes factores principales: el clima local (temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento), velocidad de evaporación, calor de reacción de los procesos oxidativos, temperatura solución de irrigación, régimen y flujos de irrigación, velocidad de aereación. La evaporación es un aspecto particularmente importante en el balance de calor de una pila y es afectado por factores como los flujos y régimen de irrigación, temperaturas de la pila y las soluciones y por las condiciones climáticas locales. La aereación, si bien es recomendable dado su efecto positivo sobre la oxigenación y población bacteriana del lecho, debe aplicarse con mesura dado el enfriamiento que puede ocasionar la evaporación que produce en el interior del lecho. En la irrigación, la evaporación se puede minimizar usando el sistema de drippers que evita el enfriamiento de las pilas incluso en climas temperados. En la operación de Quebrada Blanca, por ejemplo, el uso de drippers, el calentamiento del aglomerado, y conjugado con el uso de aislamiento térmico de las pilas, resultó en una operación a 20 °C en una zona climática en donde la temperatura promedio es 5 °C. La producción de calor asociada a la naturaleza exotérmica de las reacciones de lixiviación puede ser significativa solo cuando importantes cantidades de sulfuros se oxidan en períodos de tiempo relativamente cortos. En este contexto, el contenido de pirita del mineral tiene un rol determinante dado la gran exotermicidad asociada a la oxidación de este sulfuro. También el uso de altas concentraciones de sulfuro por unidad de lecho favorece la generación de calor, como es el caso del proceso Geocoat que opera con pilas de mineral enriquecidas con una capa superficial de concentrado. La acumulación del calor generado en las reacciones de oxidación se puede optimizar también si se controla adecuadamente la irrigación de soluciones y la aereación. Trabajos de modelación han demostrado que el alto de la pila es un factor que también ayuda a la temperatura de las pilas, encontrándose que esta aumenta con el cuadrado del alto de la pila. El control y optimización de la temperatura en pilas de biolixiviación se está explorando particularmente en relación con la aplicación de este proceso al tratamiento de minerales calcopiríticos, sulfuro que se lixivia más eficientemente con microorganismos termófilos. La idea es que las pilas se calienten inicialmente en base a la acción oxidativa de los organismos mesófilos, que operan a 20 – 30 °C. En la medida que



la temperatura de las pilas aumenta sobre 40 °C, los mesófilos son desplazados por termófilos moderados que operan a 40 – 60 °C y oxidan ferroso y azufre. Los termófilos moderados pueden desplazar eventualmente a los termófilos moderados si se llega a temperaturas sobre 60 °C. El cálculo en base a modelos indica que la temperatura que se alcance cuando se traten minerales calcopirita en pilas solo será suficiente para activar a los termófilos moderados. Sin embargo, la lixiviación con este tipo de microorganismo ya ofrece una importante ventaja en relación a la operación con mesófilos a temperatura ambiente, en la cual este mineral se pasiva obteniéndose muy bajas recuperaciones.

### 6.6.5.7 MAPEO AEREO DIGITAL – CONTROL GRADIENTE TEMPERATURA

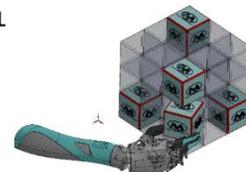
Por intermedio de la generación de mapas aéreos, por intermedio de la utilización de DRONES, en alta resolución desde 10cms/pixel hasta 3 cms/pixel con una cámara RGB. Las imágenes son capturadas con un UAV y con sistema de estabilización de imágenes para una mayor nitidez. VER ANEXO.

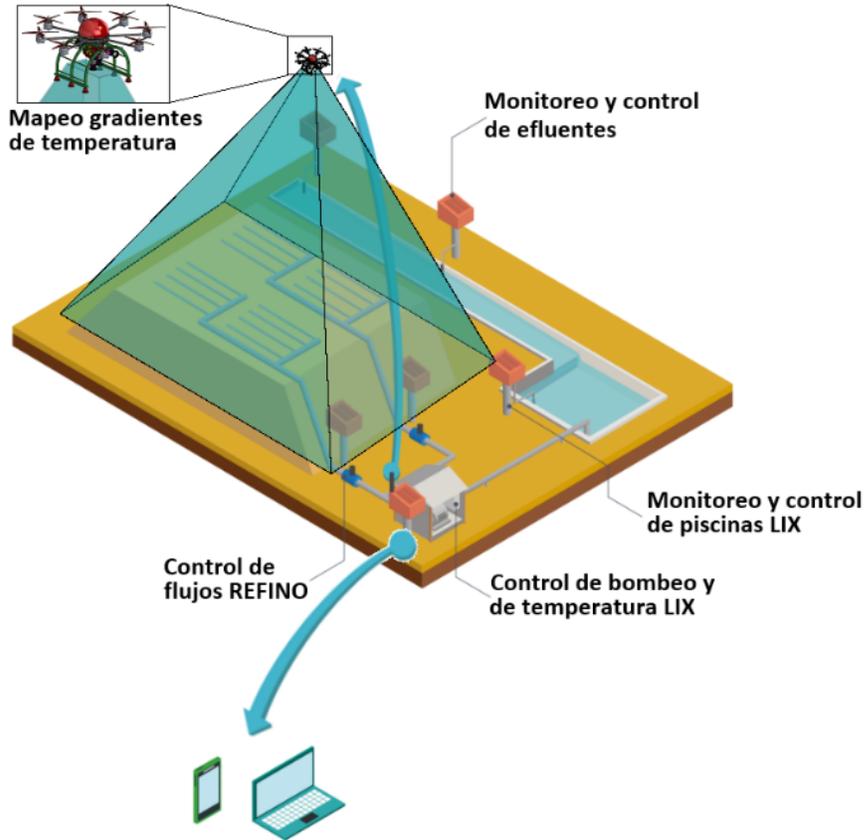
Los mapas son utilizados para:

- Seguimiento de construcción pilas de lixiviación.
- Seguimiento en tiempo real y remota del gradientes de temperaturas pilas.
- Control de fugas en piping de REFINO.
- Control de apostamiento de refino en pilas de LIX.
- Control de aireación y humedad de pilas.
- Control de flujos
- Control de efluentes e impulsión de refinós

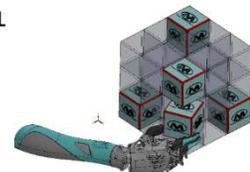


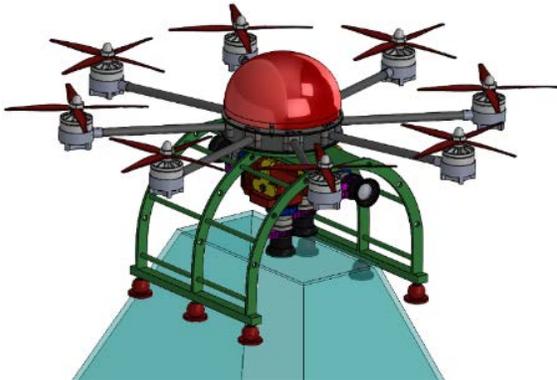
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## REPORTES DE GRADIENTES DE TEMPERATURA

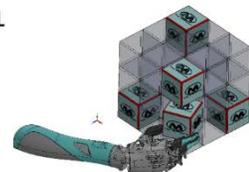


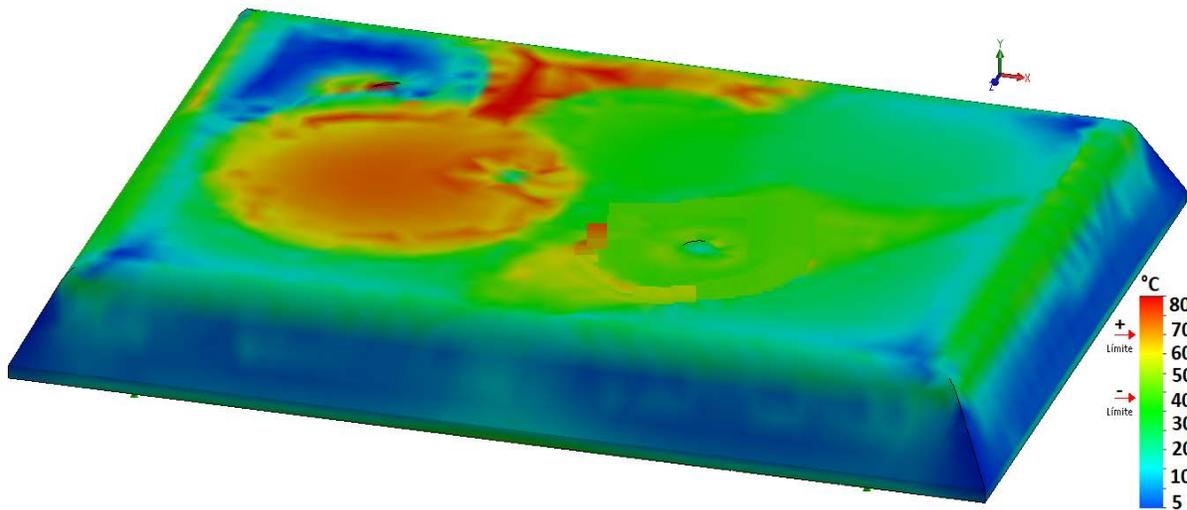
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



[www.maha.cl](http://www.maha.cl)

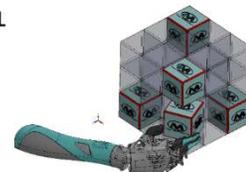
[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)





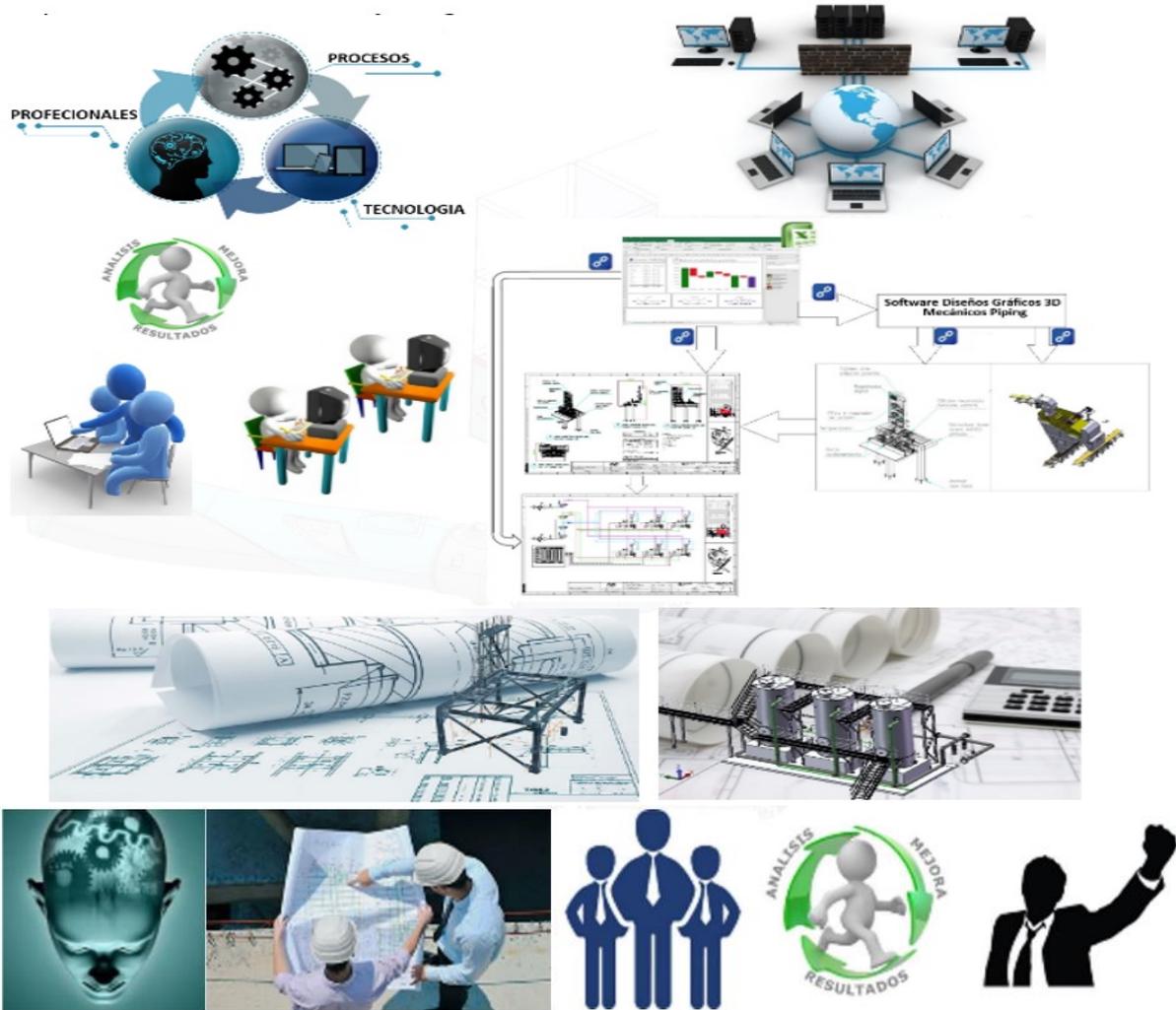
### 6.6.5.8 REMINING

Incluso cuando una pila opera eficientemente usando aireación forzada a través de la base del lecho, los perfiles de concentración de cobre en el mineral residual a lo alto del lecho





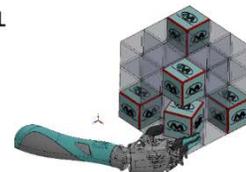
indican que siempre hay una menor recuperación en la zona inferior de la pila (ver Figura 5). Este comportamiento se puede asociar en principio a la alta concentración de cobre que hay en la solución lixiviante presente en la parte baja de la pila, lo que inhibiría la remoción de cobre desde el mineral por difusión. Para contrarrestar este problema en varias operaciones se practica exitosamente el remaining, procedimiento mediante el cual mediante palas mecánicas el mineral que está originalmente en la base de la pila se pone en la parte superior, para luego continuar la irrigación.



### 6.6.6 SISTEMA DE RIEGO



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



El material mineralizado y apilado debe ser regado con una solución lixiviante, para lo cual se tiende la malla de riego, que cubre toda el área. El sistema de riego instalado permite distribuir las soluciones ya sea por medio de un sistema de goteros, que hasta pueden estar instalados bajo la superficie de las pilas cuando las condiciones son extremas (Quebrada Blanca a 4.400 msnm y temperaturas muy bajas) o por medio de aspersores tipo wobblers o sprinklers, dependiendo de la evaporación y de la disponibilidad de agua de cada operación. Los sistemas de riego pueden ser de dos tipos:

- Cañerías de irrigación por goteo dispuestas en malla para obtener una tasa de goteo determinada, la que se expresa en L/h/m<sup>2</sup>.
- Aspersores tipo wobblers, en toda el área, y también para cubrir las áreas no irrigadas por el goteo.

El sistema de riego implementado en la pila tiene la función de permitir la circulación de tres tipos de soluciones:

- Las soluciones de refinó,
- La solución intermedia y/o el agua.

Una vez que la solución lixiviante llega a la superficie de la pila y del mineral se producen una serie de etapas secuenciales. Fundamentalmente, existe un proceso de difusión (transporte) y un ataque químico sobre la superficie del mineral. En la superficie del mineral tienen lugar las siguientes etapas:

- Difusión de los reactivos (agente lixiviante, agente lixiviante o reductor, iones H<sup>+</sup> o OH<sup>-</sup> en la superficie del mineral.
- Adsorción de los reactivos sobre la superficie del mineral.
- Reacción química entre los minerales y los reactivos.
- Desorción de los productos de la reacción de la superficie del mineral.
- Difusión de los productos solubles en la solución.

La rentabilidad y eficiencia económica del proceso de lixiviación es función del grado de disolución o del porcentaje de extracción. Sin embargo, factor de más importancia es el tiempo necesario para lograr una extracción aceptable, es decir, la velocidad a la cual ocurre la disolución del mineral. Al inicio del proceso, se produce una rápida extracción de mineral,



posteriormente ésta decrece al mínimo posible de obtener para un tamaño de partícula dado. Esta disminución puede deberse a varias causas como:

- Disminución de la superficie expuesta al ataque químico, lo que a su vez puede explicarse por el menor el número de partículas a disolver o porque en ella se forman compuestos insolubles.
- Disminución de la concentración de reactivos.
- Aumento de la concentración de minerales en la disolución, lo que puede llegar a la saturación.
- Disminución del grado de lixiviación en partículas porosas al aumentar la distancia desde el punto de difusión inicial.

### 6.6.7 RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES

Al costado de cada pila se encuentran las canaletas de recolección de las soluciones. Estas canaletas están divididas en dos secciones para poder conducir por gravedad, separada e independientemente las soluciones ricas pobres y en mineral lixiviado. Las soluciones recogidas son llevadas primero a piscinas desarenadoras, para ser clarificadas y desde allí fluyen a diferentes piscinas según la calidad de la solución:

- Piscina de solución rica (PLS), que tiene una dimensión tal que permite conocer el tiempo de retención de la solución.
- Piscina de solución intermedia (ILS), que se utiliza para regar el aglomerado fresco y generar así PLS, según corresponda.



Transporte de soluciones. Faena Radomiro Tomic.

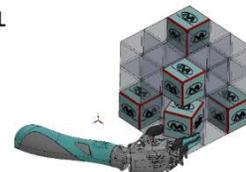
En la base de las pilas se instalan membranas impermeables (geomembranas de origen sintético) fabricadas de un material variante del polietileno, que permite interceptar las soluciones que escurren desde lo alto de la pila y conducir las a las canaletas de recolección.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



[www.maha.cl](http://www.maha.cl)  
✉ [maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / 📞 +569-78785939



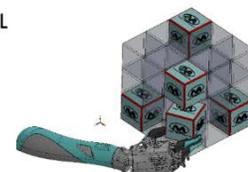


Sobre las membranas se instalan cañerías perforadas de drenaje y una cubierta de grava drenante. El control de la permeabilidad de la pila, es fundamental para evitar las fugas. Además de las membranas o láminas de impermeabilización de polietileno, éstas pueden ser fabricadas de los materiales arcillosos compactados que se encuentran en el propio terreno o a partir del suelo del patio el que se debe mejorar con aditivos químicos o minerales. El diseño de la alternativa más conveniente de membrana o sistema de sellado es un desafío importante de la ingeniería y no debe hacerse sólo por criterios económicos o de permeabilidad, sino por otros factores como durabilidad, picado, resistencia a la corrosión y otras condiciones ambientales que deben requerir experiencia y conocimiento previo. Se pueden disponer de membranas o sellados simples, dobles o triples, de acuerdo con el número de capas impermeables o membranas de igual o diferente tipo que se hayan utilizado. A continuación se entrega una tabla de factores de selección del tipo de láminas.

Tipo de láminas	Materiales	Factores de selección
■ Geomembranas	■ P.V.C. ■ Polietileno de alta densidad (HDPE) ■ Polietileno clorosulfurado (Butilo) ■ Monómero dietilen-propileno (EPDM) ■ Membrana industrial Chevron (CIM) ■ Resina sintética (Hypalon) ■ Asfalto u hormigón asfáltico	■ Tipo material (espesor, resistencia, duración) ■ Material de apoyo y cobertura ■ Método de colocación y unión

En el caso del cobre, los procesos hidrometalúrgicos de lixiviación producen en general dos tipos de soluciones:

- Soluciones fuertes con contenidos de cobre en soluciones entre los rangos de 30-50 g/L que son aptas para entrar directamente al proceso posterior de electroobtención.
- Soluciones débiles cuyo contenido de cobre en solución es menor a 10 g/L. Estas soluciones deben pasar por una etapa de concentración vía Extracción por Solventes-Electroobtención o simplemente ser tratadas por cementación.



## 6.7 ETAPA EXTRACCIÓN POR SOLVENTES - SX

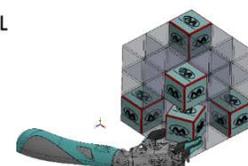


Vista aérea de la planta de extracción por solventes Faena Radomiro Tomic.

La extracción por solvente es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas provenientes de procesos de lixiviación. Este proceso encuentra su principal aplicación en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales, que luego se recuperan mediante el proceso de electroobtención en soluciones de sulfato de cobre. También se aplica ampliamente en la recuperación de uranio, vanadio, molibdeno, zirconio, tungsteno, renio, elementos de tierras raras, metales preciosos, cadmio, germanio, berilio, boro, entre otros. Fundamentalmente, la extracción por solventes es una operación de transferencia de masas en un sistema de dos fases líquidas (c) Se le llama también intercambio iónico líquido y se basa en el principio por el cual un soluto (ión metálico) puede distribuirse en cierta proporción entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente agua y el otro un solvente orgánico como benceno, kerosene, cloroformo o cualquier otro que sea inmiscible al agua. Lo anterior es posible debido a que ciertos reactivos químicos orgánicos tienen un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, con los que forman compuestos organometálicos, y simultáneamente, casi ninguna afinidad con iones contaminantes tales como iones de fierro, calcio, magnesio, aluminio, etc. Por esta razón, la principal aplicación de la extracción por solvente se encuentra en la separación selectiva de metales, y en la posterior obtención de éstos mediante un proceso adecuado como es el de electroobtención aplicada a soluciones de sulfato de cobre.

- OBJETIVOS

El proceso de extracción por solventes se incorpora como parte de un sistema integral de recuperación de la hidrometalurgia, generalmente para cumplir algunos los tres objetivos que se señalan a continuación. En la mayoría de los casos, al integrar el proceso de SX en un



circuito metalúrgico se busca cumplir con al menos uno de ellos, muchas veces dos y ocasionalmente con tres, de los objetivos que se describen:

- La separación y purificación de uno o más metales de interés, desde las soluciones que los contienen, que suelen tener impurezas. La separación consiste ya sea en extraer él o los metales deseados desde las soluciones, o a la inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando él o los metales deseados en ella.
- Concentración de los metales disueltos con el objetivo de disminuir los volúmenes a procesar y así reducir los costos para el proceso siguiente.
- Transferencia de los metales disueltos, desde una solución acuosa compleja a otra solución acuosa diferente, que simplifique el proceso siguiente.

La incorporación de la extracción por solvente dentro de la hidrometalurgia, es de gran interés en el desarrollo de ciertas operaciones específicas como las siguientes:

- La recuperación selectiva de un solo metal desde una solución de lixiviación, liberándolo de sus impurezas y concentrándolo de manera que sea más fácil su posterior recuperación. Por ejemplo, en la lixiviación del cobre, la extracción por solvente se realiza en las soluciones de lixiviación diluidas e impuras con el fin de traspasar el cobre a una solución de electrolito puro y concentrado, que permita realizar la electroobtención.
- La separación conjunta de varios metales desde una solución, debido a que ciertos elementos químicos como el Cu/Ni/Co, o del V/U/Ti, presentan una similitud de propiedades química. Mediante la extracción por solvente se separan conjuntamente para su posterior separación diferencial.
- La purificación de soluciones. Mediante la extracción por solvente se extraen las impurezas dañinas o contaminantes de una solución para dejarla limpia como solución de partida. Por ejemplo, este método se aplica en la purificación de los descartes de electrolitos de refinería de cobre, al eliminar el Fe, As y otras impurezas, permitiendo devolver la solución limpia al circuito principal.

Dado que en la lixiviación ocurre la disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila, es indispensable realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la electroobtención del metal. Por esta razón, la secuencia de las operaciones de los procesos de lixiviación son las siguientes:



- Extracción por solventes (SX)
- Electroobtención (EO)
- Obtención de cobre catódico.

### 6.7.1 ETAPAS Y MECANISMOS DE LA EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

La extracción por solventes consiste en un proceso de purificación y concentración de soluciones basada en la separación del elemento de interés, (por ejemplo cobre), desde las soluciones de lixiviación. Para ello se utiliza un medio extractante también líquido de alta especificidad al elemento a separar, pero que al mismo tiempo es inmiscible en dicha solución. En el proceso global de la extracción por solventes se distinguen tres momentos fundamentales que consisten en:

- El líquido extractante se agrega a la solución primaria, y se conecta con el ión metálico, el que queda entonces formando parte del extractante.
- Enseguida, este complejo extractante - ión metálico es separado de la solución y llevado a una solución secundaria pobre en el ión metálico.
- En esta solución secundaria se produce la reextracción. Es decir, el elemento de interés es nuevamente devuelto a la solución, la que al estar exenta de impurezas es óptima para el proceso siguiente de EO.

En general en el proceso de extracción por solvente se reconocen dos etapas fundamentales: la etapa de extracción propiamente tal y la de reextracción o stripping.

#### 6.7.1.1 COMPONENTES BÁSICOS SISTEMA SX

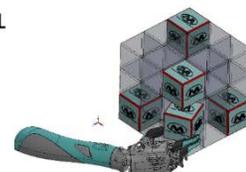
Los sistemas de extracción por solvente tienen tres componentes básicos que son, un soluto a extraer (C), un solvente acuoso (A) y un extractante orgánico (B). Los sistemas de extracción por solventes en su forma más simple constan de tres componentes:

- Un soluto a extraer C
- Un solvente acuoso A
- Un extractante orgánico B

El solvente acuoso (A) y el extractante orgánico (B) serán dos líquidos inmiscibles que formarán la fase acuosa y la fase orgánica respectivamente. Inicialmente el soluto (C) se encontrará en la fase acuosa y se deseará transferirlo a la fase orgánica. Se postulará que el soluto C es completamente miscible en ambas fases. Luego si se tienen mezclas A-B, al introducir C, la zona de inmiscibilidad se extenderá al ternario de vértices A, B y C, y la recta



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



que una de las fases R y E se denomina línea de unión de fases conjugadas), pero tendiendo a desaparecer. En un punto en la zona de las dos fases, el sistema desaparecerá en dos líquidos de composición R y E respectivamente. La concentración de C en la fase rica en B es mayor que la concentración de C en la fase rica en A, es decir, la distribución de C es más favorable para la fase rica en B. También se puede representar el sistema mediante los diagramas de distribución o de equilibrio, donde se grafica la concentración de C en una fase versus la concentración en la otra, para el equilibrio entre fases. Estos gráficos se pueden obtener directamente de los diagramas ternarios, usando las líneas de unión de fases conjugadas. En la medida en que la razón entre el porcentaje de C en fase orgánica y el porcentaje de C en fase acuosa, denominada coeficiente de distribución (D), sea mayor que 1, el proceso de extracción mediante el extractante orgánico B será factible. Si las dos fases son inmiscibles entre sí, la mejor representación del sistema se obtiene al graficar la curva de distribución en proporciones en peso con respecto a A y B en vez de concentraciones de C en las fases.

### 6.7.1.2 EXTRACCIÓN CONTINUA EN MULTITAPAS

Para poder producir la transferencia entre la fase acuosa y la orgánica se requiere que ambas sean adecuadamente contactadas y luego lograr su separación por decantación. El ideal es lograr en cada etapa el equilibrio químico entre fases. En la práctica se tienen varias etapas. Los flujos de ambas fases pueden ponerse en contacto de diversas maneras:

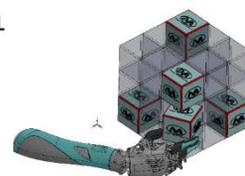
- Paralelo: se utiliza cuando la cinética de la transferencia es lenta.
- Cruzados: se utiliza cuando la capacidad de carga del extractante es pequeña y se cuenta con un gran inventario de orgánico.
- Contracorriente: es el más utilizado industrialmente en hidrometalurgia, ya que se aprovecha mejor la capacidad de carga del extractante con un menor inventario de orgánico.

Los flujos de orgánico y acuoso van en sentidos opuestos, el orgánico descargado se contacta con el acuoso que va saliendo y la solución rica a la entrada se contacta con el orgánico terminando de cargarse. El proceso de extracción por solvente se basa en la reacción reversible de intercambio iónico que tiene lugar entre dos fases inmiscibles, la fase orgánica que corresponde al reactivo extractante, y la fase acuosa que corresponde a la solución.



En la extracción por solvente se pone en contacto la solución de lixiviación (fase acuosa) con un reactivo orgánico (fase orgánica) mezclándose fuertemente por agitación. El reactivo orgánico contiene una molécula extractante (fase orgánica) que tiene una alta afinidad por el ión metálico que se quiere recuperar. Este ión de interés es transferido desde la fase acuosa (solución de lixiviación) a la orgánica, a través de la interfase de dos líquidos no miscibles. La mezcla resultante por la agitación se deja decantar, para que se separe en dos capas o fases. La fase superior corresponde a la capa orgánica, que se mantiene allí debido a su menor peso específico. En esta fase orgánica que se conoce como fase cargada o fase extracto, se encuentra retenido el ión metálico de interés formando un complejo órgano-metálico. Por su parte, la capa acuosa inferior, denominada fase acuosa o de refino, es una solución estéril respecto de iones metálicos, y tiene un peso específico mayor al de la fase orgánica. Al mezclarse las fases acuosa y orgánica, el equilibrio se irá dando paulatinamente, debido a que la transferencia de masa dentro de un reactor depende de los siguientes factores:

- Tiempo de residencia
- Área de interfases acuoso/orgánico
- Potencial químico en la interfase.



El equilibrio de la reacción es el factor más importante en el proceso de intercambio, y esto depende del tamaño de los equipos utilizados, la energía consumida en la agitación y otros factores que afecten en la totalidad de los costos del proceso. Desde este punto de vista, las dos etapas en que se puede subdividir el proceso, extracción y reextracción, pueden ser considerados uno como el inverso del otro. Por ello solo será analizar una etapa.

### 6.7.1.3 ETAPA DE EXTRACCIÓN O CARGA DEL REACTIVO

La solución impura proveniente de la lixiviación (fase acuosa) rica en iones de cobre y con una acidez baja (pH entre 1,4 a 1,9) se introduce en mezcladores especiales, en los que se contacta con la fase orgánica de muy bajo contenido de cobre (orgánico descargado). En síntesis, en este proceso se requiere una fase constituida por la solución portadora del metal (cobre) que se desea recuperar (denominada fase acuosa) y por otro lado, una fase orgánica conformada por el reactivo extractante disuelto en un diluyente orgánico. Como ambas fases son inmiscibles, para poder realizar la extracción y mezcla, es necesario aplicar una acción mecánica de elementos externos que proporcionan la energía necesaria para este propósito. Al mezclarse ambas fases, ocurre una transferencia de la especie metálica disuelta en la fase acuosa, la que se desplaza, asociándose químicamente con el reactivo extractante en la fase orgánica, hasta alcanzar el respectivo equilibrio químico. Así, se genera una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una solución acuosa descargada (agotada, pobre, refino).

### 6.7.1.4 ETAPA DE REEXTRACCIÓN O DESCARGA DEL REACTIVO

En la etapa de reextracción del reactivo consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas de la fase orgánica, lo que permite ser vuelta a usar en la etapa de extracción hacia una nueva fase acuosa, de reextracción, de características físico-químicas diferentes a la solución acuosa de lixiviación. En síntesis, de la etapa de reextracción se obtiene por un lado una solución de orgánico descargado (sin cobre) ácido,-que es recirculado a la etapa de extracción- y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, la cual es enviada a la siguiente etapa, la electroobtención.

## REACTIVOS ORGÁNICOS USADOS EN SX PARA RECUP. DE COBRE



El principal constituyente del solvente o fase orgánica es el reactivo orgánico o extractante, que es aquel que tiene la capacidad de formar complejos orgánicos con el elemento que se desea extraer.

## 6.7.2 AGENTES EXTRACTANTES

En un principio estos agentes extractantes estaban limitados para funcionar de acuerdo con un rango de pH y concentración de cobre en las soluciones que se trataban, pero en la actualidad se han logrado grandes avances, permitiendo ampliar estas limitaciones y poder utilizarlos en un rango de soluciones provenientes de lixiviación más amplio. En general, existe una amplia gama de propiedades que son usadas como patrón seleccionar un extractante en particular. Es necesario considerar que es poco probable que exista un reactivo que reúna todas las propiedades que se desean, ya que a menudo éstas se encuentran en contrastes unas de otras.

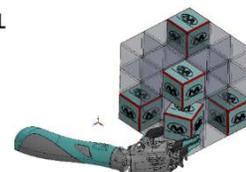
### 6.7.2.1 PROPIEDADES DE LOS AGENTES EXTRACTANTES

Las principales propiedades que deben cumplir o características que deben poseer los reactantes que se utilizan con agentes extractantes son:

- **Selectividad:** es la habilidad del extractante para extraer una sustancia de interés desde una solución acuosa. Un extractante de una alta selectividad o factor de separación, es capaz de reaccionar tan solo con aquellos iones metálicos de interés, dejando de reaccionar con todos los demás. Por ejemplo, si se desea separar una sustancia A de una B, la selectividad (A) por A se mide por la razón de los coeficientes de extracción de A y B. Cuando mayor sea A, mayor es la separación de Ay B.
- **Coefficiente de distribución:** corresponde a la razón entre la concentración de cobre presente en el orgánico y la concentración del acuoso. Este coeficiente debe ser lo más alto posible, para extraer un máximo y minimizar la cantidad de solvente.
- **Capacidad de carga:** corresponde a la máxima concentración del ión metálico de interés presente en la fase orgánica, a un pH y a una concentración de extractantes dada. Se requiere una gran capacidad de carga.
- **Insolubilidad:** es de gran importancia, ya que si existe un alto grado de mutua insolubilidad entre el extractante y la fase acuosa, sería más fácil la recuperación del extractante y disminuirían las pérdidas de orgánico en el refinó y electrolito.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



- Recuperabilidad: siempre es necesario recuperar la mayor cantidad posible de extractantes, para volverlo a utilizar; esto favorece la reducción de costos.
- Densidad: se requiere que exista una diferencia de densidad entre las fases líquidas en contacto. Cuanto mayor sea esta diferencia, mejor es la separación de las fases.
- Viscosidad: esta característica debiera ser lo más baja posible, ya que esto favorece la transferencia de masas, la separación de fases y por consiguiente, la extracción.
- Tensión superficial: cuanto mayor sea la tensión superficial, más rápido ocurrirá la coalescencia de las emulsiones, aumentando la separación de las fases.
- Seguridad: no tóxico, no inflamable.
- Estabilidad química: el agente extractante debe ser estable y químicamente inerte frente a los demás componentes del sistema.

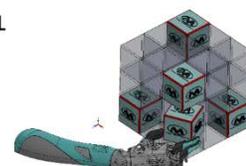
### 6.7.2.2 SELECCIÓN DE LOS AGENTES EXTRACTANTES

La solución proveniente de la etapa de lixiviación, muchas veces se caracteriza por su baja concentración de cobre y bajo pH. El extractante a usar debería cumplir con la condición de ser selectivo por el cobre y de ser capaz de actuar en las condiciones que impone la solución a tratar. Además, debería poseer otras características principalmente de carácter económico. Para que un reactivo pueda ser económicamente aceptable en hidrometalurgia, debe contar con una buena combinación de la mayor parte de las siguientes características ideales para un reactivo extractante orgánico:

- Extraer el o los metales deseados con la máxima selectividad posible desde la solución que los contiene.
- Ser descargable hacia una solución desde donde pueda ocurrir, en forma sencilla, la recuperación del metal.
- Ser de fácil regeneración en sus características físico-químicas, para una expedita recirculación a la etapa de extracción.
- Ser lo más inmiscible posible en las soluciones acuosas que contiene el o los metales de interés.
- Ser estable a las condiciones del circuito de manera que pueda ser reciclado muchas veces. Para ello debe ser químicamente estable frente al ataque de ambientes ácidos o alcalinos.
- Ser no inflamable, no tóxico, no volátil, no cancerígeno, no contaminante.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



- Ser soluble en diluyentes orgánicos económicos, o ser capaz de funcionar él mismo, además, como diluyente.
- Cumplir con una capacidad de carga aceptable para lograr una transferencia neta eficaz del metal extraído.
- Cargar y descargar el metal con facilidad, lo bastante rápido como para que los tiempos de carguío sean bajos
- Ser de fácil separación de la fase acuosa, es decir, que su inmiscibilidad sea efectiva y que la separación se logre eficientemente en tiempos razonablemente breves.
- No debe promover emulsiones estables.
- No debe transferir especies nocivas desde la descarga a la extracción y viceversa.
- Debe tener un costo económicamente aceptable. Al momento de seleccionar un reactivo como agente de extracción, deben considerarse los siguientes aspectos:
- Facilidad de obtención del reactivo.
- Costo del reactivo.
- Alta solubilidad en el diluyente orgánico a usar.
- Baja solubilidad en sistemas acuosos.
- Fácil formación de complejos con cobre.
- Rápida reacción entre el cobre y el reactivo para formar el complejo.
- Alta solubilidad de este complejo en fase orgánica.
- Baja solubilidad del complejo en fase acuosa.
- Alta selectividad por el cobre.
- Fácil recuperación del cobre desde la fase orgánica.
- Fácil regeneración del extractante.
- Propiedades físicas apropiadas para la transferencia de masa y separación de fases (baja densidad y viscosidad y alta tensión interfacial).
- Estabilidad química, bajo las condiciones de uso.
- Seguro en el uso, es decir, alto punto de inflamación, baja toxicidad y poco volátil.
- Estabilidad a fluctuaciones de temperatura ambiente.
- No tóxico para las bacterias que ayudan a la lixiviación en canchas.

### 6.7.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REACTIVOS EXTRACTANTES

Existen variados tipos de extractantes orgánicos selectivos, que se emplean para la recuperación de metales, los que se caracterizan según el mecanismo de extracción, la estructura, y la especie metálica extraída. De acuerdo al tipo de reacción de extracción que



realicen, los agentes extractantes se clasifican en tipo quelantes, ácido orgánico, sustitución del ligante, extracción neutra o solvatante y con formación de par iónico.

#### 6.7.2.4 EXTRACTANTES TIPO QUELANTES

Los modernos reactivos extractantes de cobre son predominantemente hidroxioximas, las que funcionan como agentes quelantes de los cationes de cobre de la solución, formando un compuesto de cobre orgánico soluble en parafina. Tienen una amplia utilización en la extracción de cobre desde soluciones de lixiviación con ácido sulfúrico. Este tipo de extractantes realiza una quelación, es decir forman estructura de anillos que envuelven a la molécula de extractante como una ligazón selectiva para el ión metálico, dejando los restantes cationes en solución. Por tanto los extractantes tipo quelantes son capaces de formar un compuesto orgánico con el metal de interés. Corresponden a esta clase los siguientes reactivos: LIX, ZENECA, ACORGA M5640, SME de Shell Chemicals y MOC, en el último tiempo.

De la reacción de extracción-reextracción con este tipo de extractantes, puede deducirse que se produce un intercambio de iones en el que la molécula extractora orgánica entrega dos protones a cambio de un catión de cobre. Así, la reacción de extracción genera ácido, por lo que el refino queda lo suficientemente ácido para ser devuelto a la etapa de lixiviación.

#### 6.7.2.5 LIGAZÓN SELECTIVA AGENTES EXTRACTANTES TIPO QUELANTES

Los agentes extractantes tipo quelantes, se aferran como una pinza al ión metálico; de esta forma enlazan químicamente al ión en al menos dos sitios, parecido a como se toma un objeto entre el dedo pulgar y el índice. Para lograr el enlace con el ión metálico, cada molécula del extractante se libera de un ión hidrógeno, que pasa a la solución acuosa que contiene el metal, de acuerdo a la siguiente reacción simplificada. Los subíndices indican la fase en la cual se encuentra disuelto el respectivo compuesto.



Al existir un intercambio del catión metálico por dos protones (caso de valencia de dos) la extracción está siendo directamente afectada por el pH desde sus inicios y, además, el pH irá



variando a medida que se ejecuta la transferencia, sea ésta de extracción o de descarga. Así, para un sistema en que la reacción de transferencia está basada en la quelación, la variación del coeficiente de extracción, D, está determinada por la variación del contenido del reactivo en la fase orgánica y, muy significativamente, por el pH de la fase acuosa. A medida que varía el pH, hay un aumento sostenido del coeficiente de extracción.

- En  $D = 1$  se igualan las concentraciones del metal en cada una de las dos fases y un 50% del metal se encuentra en equilibrio en cada una de ellas.
- El pH correspondiente a  $D = 1$  se denomina pH50; a pH mayores que éste predomina el proceso de extracción, a pH menores, se producirá la descarga desde la fase orgánica.

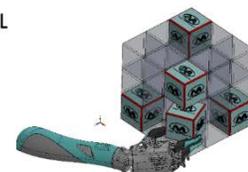
En consecuencia, cuando dos metales muestran un valor marcadamente diferente de sus respectivos pH50, para un determinado reactivo extractante, se abre la posibilidad de realizar una extracción selectiva, de un metal sin interferir el otro metal.

#### 6.7.2.6 LISTA DE LOS REACTIVOS ACTUALMENTE EN USO INDUSTRIAL.

Reactivo	Producto comercial	Extractante	Modificador
Acorga	P5100	Aldoxima	Nonil Fenol
	PT5050		Tridecanol
	M5640		Ester
Lix	Lix84	Ketoxima	No
	984	Mezcla	No
	622	Aldoxima	Tridecanol
	860	Aldoxima	No
Moc	45	Ketoxima	No
	55	Aldoxima	No

Las principales características de los reactivos extractantes tipo quelante, y que los distinguen de otras clases de extractantes, pueden resumirse en que:

- Operan sobre la base del intercambio de un ión hidrógeno cíclico.



- Operan bien tanto con soluciones ácidas como con soluciones amoniacaes.
- Por su mayor complejidad desde el punto de vista químico, son más selectivos que los extractantes de tipo iones pareados o que los de tipo ácido orgánico.
- Debido a la estructura más compleja del compuesto formado, son de una cinética más lenta que la de los extractantes de tipo iones pareados y que la de los de tipo ácido orgánico.
- Tienen buenas características operacionales respecto a la separación de fases.
- En su fabricación suelen ser más difíciles de preparar.

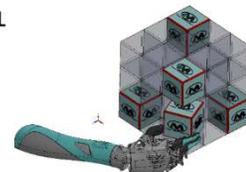
### 6.7.2.7 REACTIVOS DEL TIPO ÁCIDO ORGÁNICO

La química de estos extractantes tiene algunas características que los asemejan a los quelantes y algunas que los asemejan a los extractantes por solvatación. La reacción de intercambio del catión depende fuertemente del pH inicial y, además, éste irá variando durante el proceso de intercambio por la liberación de dos protones en la reacción, similar a lo que ocurre con los quelantes, por lo que se les aplica también los conceptos de pH50. Los reactivos que pertenecen a esta categoría son los ácidos órgano-fosfóricos, los ácidos fosfónicos y fosfínicos, sus respectivos derivados mono- y di-tio-, los ácidos organosulfónicos y los ácidos carboxílicos. Conviene tener presente que la química de la extracción usando los tio-derivados puede ser muy complicada por la superposición de reacciones de óxido reducción. Los ácidos orgánicos también pueden funcionar en combinación y sinergia con otros extractantes quelantes y/o neutros, para alterar tanto las cinéticas de extracción como los rangos de pH en el cual el metal puede ser extraído. Las características generales de los extractantes tipo ácido orgánico son:

- Muestran menos selectividad que los extractantes quelantes.
- Pueden promover emulsiones estables con soluciones alcalinas.
- Peran sobre la base de un ión hidrógeno cíclico, similar a los reactivos quelantes.
- Poseen cinéticas de extracción son normalmente muy rápidas.
- En general como clase, no son muy difíciles de producir y, por lo tanto, están disponibles en cantidades comerciales a un costo razonable.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



### 6.7.2.8 REACTIVOS DEL TIPO SUSTITUCIÓN LIGANTE

Estos reactivos tienen uno o más pares de electrones que pueden formar un enlace simple con el ión metálico, desplazando a otras especies ("ligante") que pueden estar enlazadas formando un complejo con el metal. Este tipo de reactivos participa en reacciones que presenta las siguientes características:

- La extracción del metal normalmente no es sensible al pH, ya que el intercambio es sólo de electrones.
- En ocasiones se pueden lograr en forma notable, altas selectividades.
- Las cinéticas de las reacciones pueden ser rápidas o lentas, dependiendo del metal y del tipo de ligante que se deba desplazar.
- Estos reactivos pueden ser relativamente económicos, o muy caros, dependiendo de la complejidad de la molécula orgánica que se use.

### 6.7.2.9 REACTIVOS DEL TIPO EXTRACCIÓN NEUTRA O SOLVATANTE

Este tipo de reactivo orgánico extractante se coordina con ciertos complejos metálicos reemplazando sus áreas de hidratación. El complejo organometálico resultante, al haber perdido sus sales de hidratación, se vuelve insoluble en agua y así puede pasar fácilmente a la fase orgánica. Los reactivos solvatantes se clasifican de acuerdo a su grado de habilidad para donar electrones a un metal y pasar a formar un complejo organometálico. Los reactivos más útiles de esta clase son los organofosforosos, aunque también se han reportado extensos trabajos con las cetonas y los éteres. En general, la extracción con reactivos del tipo solvatante está limitada por:

- La habilidad de las especies metálicas para formar complejos neutros con aniones.
- La co-extracción de ácido a altas concentraciones de ácido.
- La solubilidad del complejo organometálico en el portador orgánico.
- Las principales características de los reactivos de tipo extracción neutra, o solvatante, son las siguientes:
  - Normalmente muestran cinéticas de reacción bastante rápidas;
  - Extraen complejos metálicos de carácter neutro;
  - En general, no son selectivos;

- En combinación con otros reactivos orgánicos, los reactivos de tipo solvatante pueden actuar en forma sinérgica, y también como antagónicos o como modificadores de fase;
- Debido al enlace débil que caracteriza este mecanismo de extracción, en la generalidad de los casos, la descarga del reactivo se ejecuta con facilidad mediante el uso de agua.

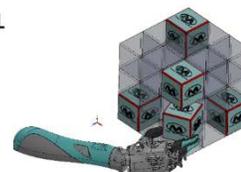
#### 6.7.2.10 REACTIVOS O.E. CON FORMACIÓN DE PAR IÓNICO

Estos reactivos actúan basados en el principio de asociación iónica, en la cual una gran molécula orgánica, de carga positiva, provoca la extracción de un complejo metálico aniónico hacia la fase orgánica, con la correspondiente expulsión de un anión inorgánico pequeño hacia la fase acuosa. Ejemplos de este tipo de reactivo son los extractantes en base a aminas. Entre éstas se puede destacar, por un lado el comportamiento de las aminas primarias, secundarias y terciarias y, por el otro, el de las aminas cuaternarias. Dado que las aminas pueden formar sales con una amplia variedad de ácidos, las posibilidades para la elección de reactivos para el intercambio iónico líquido es muy extensa, por ejemplo para una misma amina se tiene la sal de cloruro, la sal de bisulfato, etc. Los reactivos para extracción del tipo amina pueden descargarse mediante una amplia variedad de soluciones formadas con sales inorgánicas. El tipo de agente de descarga que se use depende del proceso de recuperación global del metal que se estará diseñando, pero en general, son los agentes alcalinos de descarga los que revierten en una mejor forma la reacción de protonación de la amina, entregando la mejor descarga en el menor número de etapas. Existen dos variables del sistema metálico acuoso, diferentes del pH, que afectan la extracción del metal mediante un reactivo de extracción del tipo amina. Estas son, por un lado, el estado de oxidación del metal y, por otro, la concentración de los aniones comunes. Algunas de las características propias de los reactivos de atracción tipo aminas, que los distinguen de los otros tipos de extractantes, son:

- Generalmente requieren del uso de modificadores de fase, normalmente alcoholes de cadena larga y/o el uso de diluyentes aromáticos, con el objeto de prevenir la formación y precipitación de complejos orgánicos del tipo amino metálicos insolubles.
- Las cinéticas de extracción y de descarga son usualmente muy rápidas.
- Las aminas cuaternarias y terciarias son más selectivas que las secundarias o primarias, pero son menos selectivas que los quelatos.
- Hay una amplia variedad de aminas que están disponibles y/o que se pueden sintetizar con facilidad.
- Las aminas extraen complejos metálicos aniónicos.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





- La extracción con aminas generalmente ocurre a partir de soluciones ácidas, hasta casi neutras, con el mejor rango de pH disponible, dependiendo del sistema específico.

### 6.7.2.11 PÉRDIDAS DE EXTRACTANTE

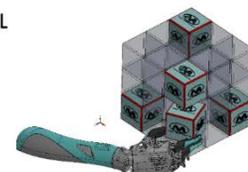
Las pérdidas de extractantes tienen gran importancia en la viabilidad económica de una planta. Éstas ocurren principalmente por evaporación o por solubilidad, o por entrapamiento durante el procesamiento en las plantas. Así como la solubilidad es sensible al pH, las pérdidas también son dependientes de la acidez, y más aún teniendo fases acuosas alcalinas. En la siguiente tabla se entrega los valores de las pérdidas de algunos reactivos:

Metal extraído	Extractante	pH de extracción	Pérdidas (ppm)
Cu	Kelex 100	1 - 2	10
Cu	Lix 64 N	1,5 - 2	4 - 15
Co	V 911	7,7	100
Co	D2 EHPA	5,5 - 6,5	30
Ni	Ácido Nafténico	4,0	90
NI	Ácido Nafténico	6,5	900
Ni	V 911	7,0	900 - 300
HF	MIBK	1,5 M NCL	20.000
Tierras raras	D2 EHPA	2,0	7
U	Amina Ternaria	1,5 - 2,0	4 - 15
U	TDP	2,0	25 - 40

### 6.7.3 DILUYENTES

Los diluyentes y modificadores corresponden a otros componentes de la fase orgánica que tienen funciones específicas en la optimización del proceso de extracción.

En un circuito de extracción por solvente (SX) la fase orgánica normalmente está conformada por uno, dos o tres componentes: el extractante, el diluyente y algún modificador. Por lo general, el diluyente es el componente de la fase orgánica que está presente en mayor



proporción dentro de ella. En la mayoría de los casos los reactivos requieren ser diluidos antes de poder usarlos, (existen algunas excepciones, particularmente con los solvatantes) donde el reactivo extractante también puede funcionar como diluyente. Los diluyentes se utilizan principalmente para disminuir la viscosidad de la fase orgánica, permitiendo que fluya fácilmente y facilitar así el contacto entre las dos fases, y también para reducir la excesiva concentración del extractante orgánico activo. Al igual que en el caso de los agentes extractantes, el diluyente debe cumplir ciertos requisitos. Entre los más importantes se señalan los siguientes:

- Ser capaz de disolver el extractante y de mantenerlo en solución.
- Tener baja viscosidad y densidad.
- Tener estabilidad química.
- Presentar baja solubilidad en la fase acuosa.
- Poseer un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

### 6.7.3.1 CARACTERÍSTICAS

El diluyente se usa, por un lado, para reducir la viscosidad de la fase orgánica, y también, adecuar la concentración del extractante con el contenido de metal de la solución de lixiviación. Las propiedades más importantes de un diluyente son:

- Tener baja viscosidad y una densidad adecuada para favorecer la separación de fases y reducir los arrastres de una fase en la otra.
- Tener baja solubilidad en la fase acuosa, para evitar o disminuir al máximo las pérdidas por disolución en la fase acuosa, o ser insoluble en la fase acuosa.
- Tener una pureza adecuada y estar libre de componentes extraños, con el objeto de minimizar la formación de borras.
- Mezclarse bien en el tonel reactivo de extracción, para disminuir su viscosidad y facilitar el contacto entre fases, permitiendo una buena separación en el decantador.
- Ser químicamente estable bajo todas las condiciones de operación del circuito.
- Tener un alto punto de inflamación de 25 °C o más, por encima de la temperatura más alta prevista para la operación del circuito SX.
- Tener bajas pérdidas por evaporación, baja tensión de vapor.
- Baja toxicidad.

- No interferir perjudicialmente en la química de las reacciones de extracción y descarga del metal.
- Tener un costo reducido para favorecer la economía del proceso.
- Estar disponible con facilidad, en grandes cantidades y a bajo costo.

### 6.7.3.2 ELECCIÓN DEL DILUYENTE

Dado que el diluyente es un componente importante y mayoritario de la fase orgánica, todo operador de planta SX debe realizar las máximas pruebas de control de calidad a cualquier nuevo embarque de diluyente que llegue a su circuito SX. Las pruebas de control de calidad deben reflejar adecuadamente todas las propiedades críticas, o que sean consideradas más importantes, para el éxito de la operación. El mejor diluyente para un determinado sistema de SX puede no ser el más recomendable para otro sistema de SX diferente. Cada operador de planta debe preocuparse de solicitar la asesoría de especialistas para estudiar varios diluyentes antes de determinar el más adecuado para sus propias condiciones de operación y localización de la planta. Normalmente, el diluyente se puede comportar como un compuesto químicamente inerte, pero existen ocasiones, como en algunos casos de su uso en el proceso de SX para cobre y uranio, en que el diluyente también influye en el comportamiento del reactivo y puede ser un participante esencial en el éxito o eventuales dificultades operacionales del proceso. En las ocasiones en que el diluyente interactúa con el reactivo en la fase orgánica, puede favorecer la polimerización del reactivo y restar así parte de los componentes activos dentro de la fase orgánica. Otros diluyentes producen el efecto contrario, lo que en los casos de extracción por intercambio catiónico, se puede detectar midiendo la constante dieléctrica del diluyente, siendo el menor valor resultante el que da las mejores extracciones. Los diluyentes para SX más usados a escala industrial son (o han sido):

- Benceno (no se usa actualmente por ser cancerígeno)
- Hexano
- Keroseno
- Cloroformo
- Tetracloruro de carbono

En el caso del proceso SX para cobre y uranio, los diluyentes más habituales para son los kerosenos obtenidos mediante destilación. Las exigencias para su elección son las siguientes:





Propiedad	Rango exigido
punto inicial de evaporación	entre 200 y 220 °C
rango de destilación	240 y 260 °C
punto de inflamación	mayor que 75 °C
contenido de compuestos aromáticos	entre 0,5 y 25%

En el mercado hay disponibles diluyentes de estas características, procedentes de distintas refinерías. Los principales proveedores de kerosene, para uso en SX, han sido tradicionalmente EXXON, con sus diversos productos de la línea Esquiad 100, 110, 103; Phillips Petroleum, con sus productos de la línea Orfom SX; MacGee, Kermac 470 y 470B; Shell, con su línea Sheesol; ENAP, con su producto Solmin. Hay ocasiones en que se seleccionan diluyentes que tienen un contenido de aromático de 95% o mayor. Los diluyentes aromáticos tienden a ser más caros, por lo que su empleo está reservado para situaciones en donde alguna de sus propiedades es muy necesaria, y tan especial que pueda ser más importante que el costo.

#### 6.7.4 MODIFICADORES

Corresponden a cualquier producto orgánico que al ser añadido y disuelto en la fase orgánica, altera el comportamiento de un determinado reactivo de SX. Los modificadores tienen como función optimizar la separación de las fases, mejorando la coalescencia, aumentando la solubilidad de complejo metálico y evitando la formación de una tercera fase. Los modificadores son capaces de:

- Actuar sobre la separación de fases, facilitando la coalescencia y disminuyendo los arrastres.
- Participar en el control de la generación de crudo y/o terceras fases, favoreciendo la solubilidad del complejo órgano-metálico en la fase orgánica cargada.
- Estabilizar la molécula del reactivo, permitiendo su utilización indefinida al reducir su degradación.

Por ejemplo, en el proceso SX del cobre se añaden como modificadores al reactivo principal que es una oxima, otra oxima, alcoholes de cadena larga, fenoles y ésteres.

#### 6.7.5 SOLUCIÓN ACUOSA



La solución acuosa, normalmente es una solución rica de lixiviación, y corresponde a la fase portadora del metal o de los metales que interesa procesar por extracción, se denomina PLS ("pregnant liquor solution"). Luego de ser procesada por X (extracción), cambia de denominación a solución pobre o refinado, o solución de refino (RF de "reffinate") y suele ser enviada de regreso a la lixiviación. Existen cuatro características o propiedades del PLS, las que pueden ser controladas o modificadas de manera de lograr una más eficiente separación o purificación del metal mediante SX:

- Acidez libre (nivel de pH)
- Potencial de óxido-reducción (potencial redox expresado por el nivel de Eh)
- Concentración de aniones que forman complejos (como cloruro, sulfato y cianuro)

Temperatura, la que es directamente influyente en:

- El equilibrio de la extracción
- Las cinéticas de transferencia del metal
- La solubilidad de las especies extraídas
- La separación de fases
- Las pérdidas por atropamiento y arrastre

### 6.7.6 EQUIPOS EN PLANTA DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

Los procesos de extracción de cobre por solvente a partir de la solución de lixiviación que se han desarrollado a escala industrial, se basan principalmente en la puesta en contacto de esta solución lixiviada con el disolvente sin carga, el que se realiza en 3 ó 4 etapas de mezcladores y sedimentadores que funcionan en contracorriente, dispuestos y arreglados de manera de asegurar que el disolvente entrante -sin carga- tenga un contacto final con la solución acuosa estéril saliente (el refino), que después de esta etapa retorna a la operación de lixiviación para uso posterior. La transferencia de la fase orgánica recientemente cargada, hacia la sección de agotamiento donde está puesta en contacto con el electrolito agotado fuertemente ácido, se desarrolla en una serie de 2 a 3 etapas en contracorriente en mezcladores y sedimentadores. Después de la etapa final de agotamiento, la fase orgánica estéril se retorna a la sección de extracción. El electrolito enriquecido es bombeado al circuito de separación por electrólisis (electroobtención), de manera que sólo una parte del total del electrolito en circulación se

envía al circuito de agotamiento, con el fin de reducir el volumen de electrolito en esa sección y aumentar la eficiencia del proceso. El equipamiento básico de una planta de SX consiste en:

- Un mezclador relativamente profundo, que recibe por bombeo las fases acuosa y orgánica, para su mezcla y emulsión. Este mezclador cuenta con un impulsor que evita el arrastre de la fase orgánica (como finas dispersiones) en la fase acuosa de acuerdo con una configuración y velocidad rotacional que se le ha definido.
- Un sedimentador, poco profundo y de gran área. Mediante este equipo se logra la separación de las dos fases, facilitado por un sistema de doble compuerta que va por todo su ancho.
- El aumento de la temperatura en la emulsión hasta cerca de 25°C, mejora la rapidez de la reacción y permite lograr mejor la separación de fases.
- Una manguera distribuidora que va entre el mezclador y el sedimentador, para asegurar un flujo laminar.
- Equipos mezcladores decantadores (mixer-settler) del tipo perfil bajo, formados por un cajón mezclador múltiple y un decantador al mismo nivel que el mezclador. En el mezclador se produce la mezcla de la solución acuosa con el reactivo de extracción, usando un agitador que bombea y agita la mezcla mediante una turbina.

### 6.7.7 PARÁMETROS DE LA OPERACIÓN DE PLANTA

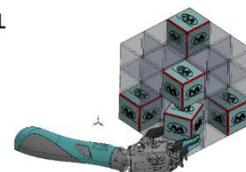
- Relaciones de flujo orgánico / flujo acuoso (O/A), medidos en las etapas de extracción y de descarga (de recirculación del electrolito necesario para alcanzar razón de O/A requerida en el mezclador).
- Tiempo de residencia en mezcladores la que se expresa en minutos.
- Flujo total en cada equipo (m<sup>3</sup>/min) y equivalencia de (m<sup>3</sup>/h) de flujo acuoso tratado.

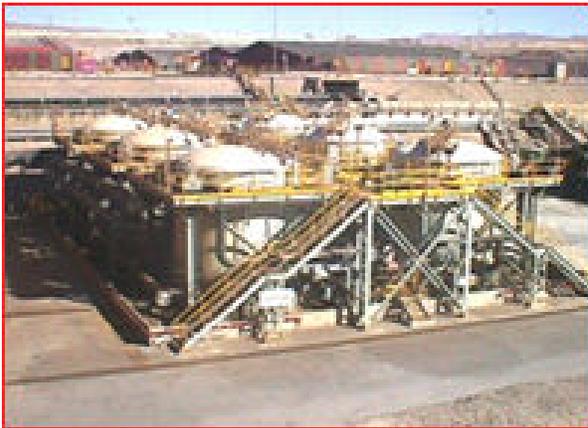


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



www.maha.cl  
maha@maha.cl / +569-78785939





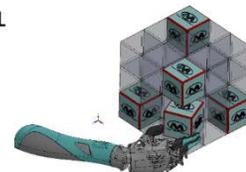
Coalescedores de la planta de Chuquicamata.

Remoción de arrastres de fase acuosa (acuoso) en orgánico.

### 6.7.8 PLANTA PILOTO SOLVENT EXTRACTION – SX

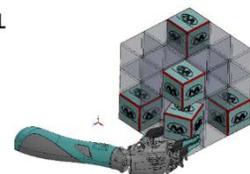
- Diseño proceso de SX.
- Fabricación y suministro de equipos.
- Implementación sistema eléctrico.
- Pilotaje de sistema SX.
- Diseño de redes de distribución electrolitos y orgánicos circulantes.
- Diseño hidráulico sistema distribución SX-EW. Impulsión y distribución de electrolitos, orgánicos, acuosos, circulantes
- Reciclaje orgánico y acuoso con control de flujo.
- MANUAL DE OPERACIÓN.

La unidad descrita dispone de equipos aptos para inferir simulaciones de procesos hidrometalúrgicos, principalmente para procesar soluciones ricas en cobre, concentrarlas y luego ser derivadas a una planta de electro obtención. Planta de extracción por solventes, con una configuración de 2 etapas de extracción, 1 etapa de lavado de orgánico y 2 etapas de re extracción. Esta configuración puede ser modificada de acuerdo a las experiencias particulares que se deseen ejecutar. La solución rica o PLS es derivada desde una planta de lixiviación por columnas u otro proceso hasta un TK inicial de PLS, desde el cual comienza a ser descargada en la etapa N1 (E1) mediante un extractantes (puede ser lix 984 u otro) en 2 etapas sucesivas. En la etapa N2 (E2) se evacua un refino descargado (retorna a lix) y un orgánico cargado, que es derivado hasta la etapa de lavado (EL), donde se mezcla con agua y luego se deriva hacia la etapa de re extracción (RE1). En 2 etapas sucesivas (RE1 y RE2) el orgánico se pone en contacto con una solución de electrolito de elevada concentración de ácido, en que es descargado del cobre contenido. El orgánico ahora descargado retorna al





circuito de partida y el electrolito ahora cargado avanza hacia la planta de EW. Desde la planta de EW retorna electrolito agotado para captar en la etapa de RE el ciclo de carga. Este proceso puede ser continuo o Bach, dependiendo de los parámetros operacionales elegidos para la experiencia en particular.



## 6.8 ETAPA ELECTRO-OBTENCIÓN DE COBRE - EW

La electro-obtención de cobre es la recuperación del cobre como metal a partir de una solución en una celda electroquímica. La electro-refinación de cobre es la purificación de cobre por disolución y posterior recuperación sobre un cátodo por vía electroquímica. En una refinería en general, las celdas se ordenan en grupos y subgrupos que pueden llamarse “circuitos”, cuando se consideran las celdas alimentadas por un rectificador y/o un sistema hidráulico independiente, y “secciones” a los grupos de celdas relacionados con las operaciones de carga y cosecha de cátodos. Cada circuito es una refinería en sí, con redes hidráulicas y eléctricas propias. Normalmente un circuito independiente se destina a la fabricación de hojas de partida. En general en electro-obtención se tratan dos tipos de soluciones: “fuertes” con contenidos de cobre entre 30 y 50 [gpl] y “débiles” con menos de 10 [gpl]. Las soluciones débiles deben pasar previamente por un proceso de concentración y purificación, generalmente extracción por solventes orgánicos. Las celdas pueden ser de concreto revestido en PVC y hoy día se tiende a reemplazar estos materiales, con muy buenos resultados por concretos poliméricos. Una celda acepta del orden de 50 ánodos y 51 cátodos. La conexión eléctrica de las celdas es en serie (Walker). En refinación cada ciclo anódico dura entre 24 y 28 días. El ciclo catódico entre 12 y 14 días. Los cátodos iniciales miden un poco más que los ánodos. Las hojas madre para la fabricación de láminas de partida puede ser de cobre, acero inoxidable o titanio. La electro-obtención de cobre se realiza en una celda compuesta por un cátodo sobre el cual se recupera el cobre y por un ánodo que debe ser inatacable para evitar la contaminación de la solución. El cátodo inicial es una lámina delgada de cobre y el ánodo es una placa de aleación de plomo (Pb-Sb o Pb-Ca). Las semi-reacciones que ocurren son:

### LA REDUCCIÓN DEL ION CÚPRICO,



### LA OXIDACIÓN DEL AGUA,



Para realizar la electrolisis es necesario aplicar entre los electrodos una diferencia de potencial mayor que la diferencia mínima de electrolisis. Para la obtención en condiciones estándar esta diferencia de potencial mínima es de  $1.23 - 0.34 = 0.89 \text{ [V]}$ . De acuerdo con la ley de Nernst el potencial de una placa de cobre a  $25^\circ\text{C}$  es,

$$E = E_0 + 0.03\log[\text{Cu}^{2+}]$$





La reacción anódica que ocurre sobre la placa de aleación de plomo, es la electrolisis del solvente. En este caso,

$$E = E_0 - 0.06pH$$

La diferencia de potencial mínima o potencial de descomposición  $E_d$  es,

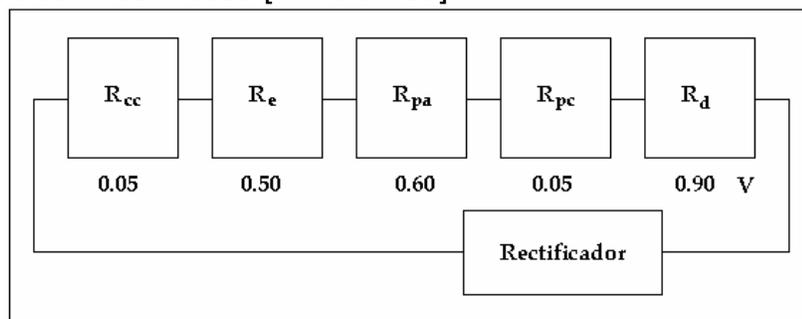
$$E_d = E_0^2 - E_{Cu} = 0.89 + 0.06 \log \frac{[H^+]}{[Cu^{2+}]^{0.5}}$$

que para las condiciones medias reales  $[H^+] \approx 0.5$  y  $[Cu^{2+}] \approx 0.3$  vale,

$$E_d \approx 0.9 \text{ [V]}$$

Es interesante desde el punto de vista del consumo de energía minimizar este valor  $E_d$  disminuyendo la concentración de ácido y aumentando la concentración del ion  $Cu^{2+}$ . Cuando la electro-obtención es la etapa que sigue a la lixiviación esos valores están condicionados por la etapa anterior. La implementación del proceso de extracción por solventes hace posible, debido a la pureza de las soluciones, obtener directamente por electro-obtención cátodos de calidad electro-refinado. En este caso es posible lograr altas concentraciones en cobre y en ácido.

La tensión de celda es de 2 a 2.5 [V]. Gran parte de este potencial se utiliza en producir la reacción electroquímica. En el electrolito la caída de tensión es también alta debido a la relativamente baja concentración en ácido sulfúrico. Las soluciones de lixiviación para electro-obtención tienen una conductividad del orden de 0.2 [mho/cm] y el consumo de energía es de 2700 – 3000 [kWh/ton Cu].



Circuito equivalente para electro-obtención. La caída de tensión total para un circuito de electro-obtención puede expresarse como,





$$E = E_d + R_{cc}I + E_{el} + \eta_a + \eta_c$$

donde,

- $R_{cc}$  : resistencia equivalente de conexiones y barras  
 $R_e$  : resistencia del electrolito  
 $I$  : intensidad de corriente en la celda  
 $\eta_a$  : sobretensión anódica  
 $\eta_c$  : sobretensión catódica

### EFICIENCIA DE CORRIENTE.

La eficiencia de corriente es la razón entre el cobre realmente recuperado y el cobre que teóricamente debiera depositarse para la cantidad de corriente entregada, de acuerdo con la ley de Faraday

$$E_j = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{teorico}}}$$

$M$ : peso cobre depositado en [kg]

La pérdida de eficiencia de corriente se debe a varias causas:

- fugas de corriente
- disolución química de cobre
- cortocircuitos
- reacciones parásitas

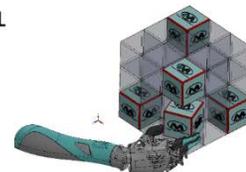
Las fugas de corriente en general no son importantes y no alcanzan al 1% de la corriente entregada.

Cuando la celda está desconectada eléctricamente es susceptible de producirse la siguiente reacción,



La velocidad de esta reacción es

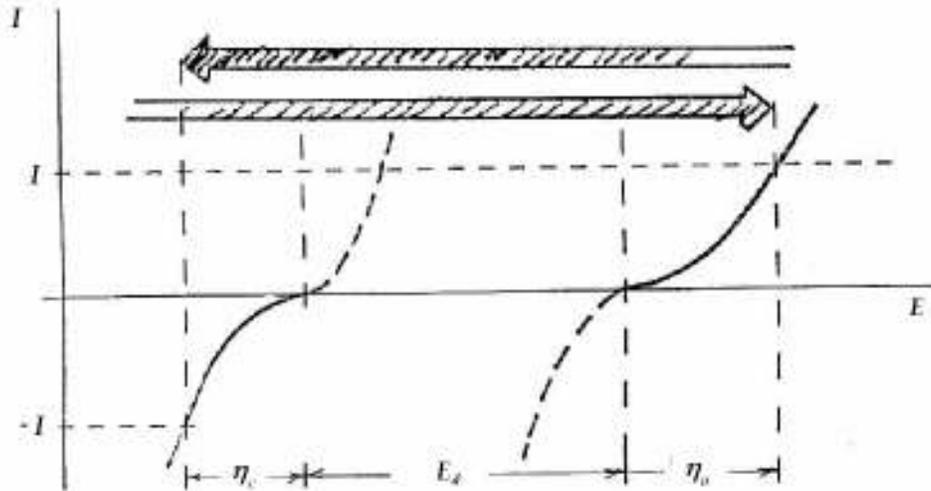
del orden de 2 – 4 [g/h].



## REACCIONES PARÁSITAS

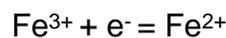
La principal pérdida de eficiencia de corriente en electro-obtención se debe a las reacciones parásitas. Pueden distinguirse dos situaciones para,

- tensiones superiores a la tensión del cátodo, y para
- tensiones inferiores a la tensión del ánodo.



Toda especie con un potencial de óxido-reducción superior al potencial del cátodo será susceptible de reducirse sobre el cátodo y toda especie con potencial de óxido-reducción inferior al del ánodo puede oxidarse anódicamente. En la práctica, las eficiencias catódicas en electro-obtención varían entre 77 y 92%.

En la refinera de Chambishi, con un electrolito que contiene 4 [g/l] en  $Fe^{2+}$  y 6 [g/l] en  $Fe^{3+}$ , la eficiencia catódica es de 77%. En Nchanga (Zambia) el electrolito contiene 2.1 [g/l] en  $Fe^{2+}$  y 0.5 [g/l] en  $Fe^{3+}$  y la eficiencia es de 85%. Estos valores ponen en evidencia el papel que juega el hierro, principal impureza desde el punto de vista de la eficiencia de corriente.

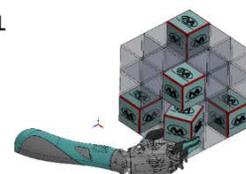


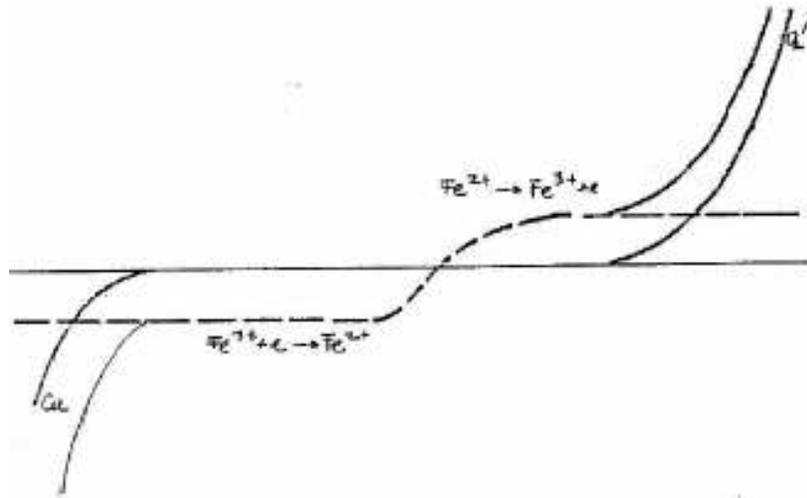
Con,

$$E = 0.77 + 0.06 \log \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]}$$

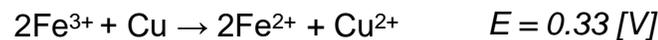


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

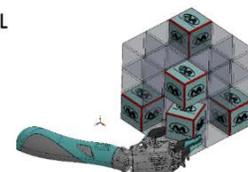




El ion férrico produce además problemas de corrosión en las orejas de los cátodos por establecimiento de una tensión mixta.



El hierro puede eliminarse por descarte parcial de soluciones a las que previamente se les ha extraído el cobre: oxidando la solución con  $\text{MnO}_2$  y neutralizando a  $\text{pH} = 2 - 2.5$ , de modo de precipitar hidróxidos de hierro: utilizando fosfatos. El plomo, proveniente de los ánodos, es también una impureza nociva. Para esto se discuten dos tipos de soluciones: la utilización de ánodos de aleaciones Ca-Pb que presentan un  $\text{PbO}_2$  de contextura diferente más resistentes y menos contaminantes o el uso de ánodos de titanio recubiertos de óxidos activos de rutenio, platino, iridio, etc. La pureza de los cátodos de electro-obtención es de 99.75 – 99.9%.



	Chambishi (Zambia)	Nchanga (Zambia)	Shituru (Zaire)	Chuquicamata (Chile)	Bluebird (Miami) SX	Bagdad (Arizona) SX	Nchanga (Zaire)
Producción [ton/año]	20000	110000	125000	130000	5000	6500	100000
Electrolito a celda							
Cu [gpl]	45	45	55	22	36	50	55
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [gpl]	30	29	7	54	146	150	150
Fe <sup>2+</sup> [gpl]	4	2.1	1.8	3.4	0.2		0.1
Fe <sup>3+</sup> [gpl]	6	0.5	1.0	1.4	1.3		0.6
T °C		55	62	30	25	27	43
Electrolito de celda							
Cu [gpl]	25	28	30	8	33	25	30
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [gpl]	70	59	62	60	151	185	185
Ánodos material	Pb-Sb	Pb94-Sb6	Pb94-Sb	Pb-Sb14-Ag0.6	Pb94-Sb		Pb-Sb6
LxA [m]		1.1x0.85	1.15x0.75	1.3x0.85			1.06x0.88
Espesor [m]		0.012	0.01	0.01			0.015
vida [años]		2 - 3	2 - 3	6 - 7			2
Cátodos							
LxA [m]		0.95x0.95	1.05x0.85	1.20x0.90	0.90x0.90		0.95x0.95
ciclo [días]	5	4 - 5	6	5 - 8	8		5
peso [kg]	40	40 - 50	45	70	60		80
Cu %		99.54	99.75	99.9	99.9	99.9	99.5
Celdas							
LxA [m]		4.5x1.2	20x1.2	5.8x1.1			6.6x1.1
Prof. [m]		1.0	1.3	1.5			1.3
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	0.01	0.015	0.02		0.05	0.3	0.1 - 0.2
Consumo							
i [A/m <sup>2</sup> ]	180	200	235	130	180	195	320
Ef. Farad.	77	85	88	76	80 - 85		88
V celda [V]	2.5	2.25	2.15	2.05	2.0	2	2.0
[kWh/ton Cu]	2700	2300	2000	2200	2600	2200	2200

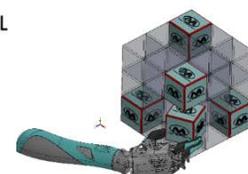
Condiciones de trabajo de algunas plantas de electro-obtención de cobre.

### 6.8.1 PLANTA PILOTO ELECTROWINN - EW

- Fabricación y suministro de equipos.
- Implementación sistema eléctrico.
- Pilotaje de sistema EW.
- Diseño de redes de distribución electrolitos circulantes.
- MANUAL DE OPERACIÓN.

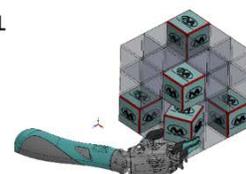
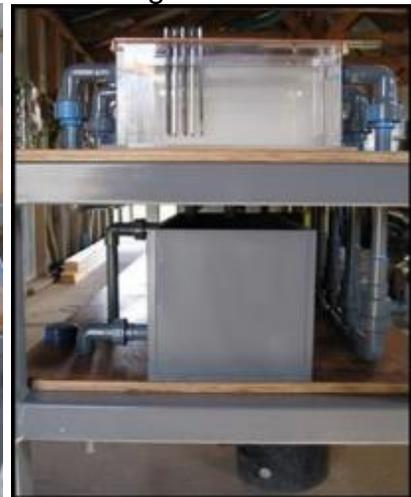


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





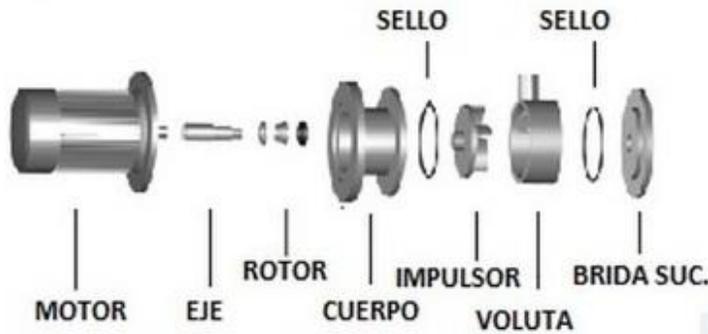
La unidad seleccionada dispone de 1 área definida por el mandante para inferir simulaciones de procesos hidrometalúrgicos, principalmente en electro obtención de cobre soluble. El área de electro obtención, tiene por objetivo captar el cobre soluble y depositarlo en un cátodo permanente en las celdas de electrolíticas. Estas celdas reciben soluciones cargadas (electrolito cargado) desde una planta de extracción o desde un método batch de carga en laboratorio y son mezcladas en proporciones adecuadas para generar un electrolito circulante que es fluido por el set de ánodos y cátodos dispuestos en las celdas. En estas celdas se aplica un potencial eléctrico de corriente continua a parámetros de densidad de corriente limitada por potenciómetros de la fuente de poder. Desde la planta electrolítica se obtiene cobre metálico y electrolito descargado o pobre, el que es retornado a la planta de extracción o laboratorio para ser cargado nuevamente y cierra el ciclo de carga.



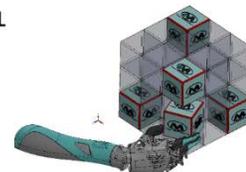


## 6.9 IMPULSION DE FLUIDOS

Los equipos y bombas diseñadas y fabricadas por MAHA, son capaces de permitir la operación con soluciones altamente agresivas, con altos rendimientos energéticos y bajo índices de mantención y detenciones no programadas.



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





## 7. ESTRUCTURAS Y OO.CC.

### 7.1 INGENIERIA ESTRUCTURAS METALICAS.

- Puentes grúa.
- Plataformas industriales y grating.
- Estructuras complementarias a existentes.
- Barandas y pasillos de tránsito.
- Estándar de soportes Piping.
- Ampliaciones estructurales.
- Naves industriales (Galpones).



### 7.2 ESTRUCTURAS PESADAS, MEDIANAS Y LIGERAS.

- Fabricación y montaje de estructuras Metálicas para la minería y obras Industriales, soldaduras especiales, sistema Mig-Mag, Arco y Tig.
- Frame de harneros, instalar módulos de poliuretano.
- Soportes baterías de hidrociclones.
- Capotas protectoras para cintas transportadoras.

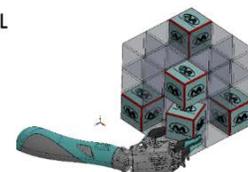


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



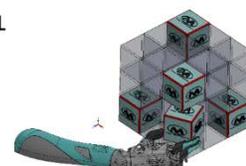
[www.maha.cl](http://www.maha.cl)

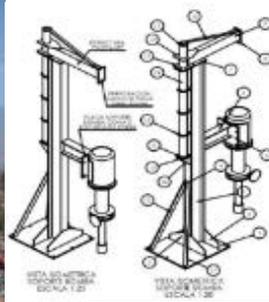
[maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / [+569-78785939](tel:+569-78785939)





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

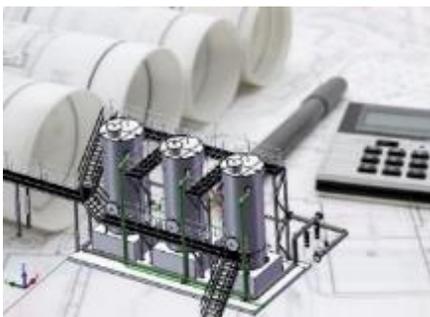




LISTA DE MATERIALES									
ITEM	CANT	UNID	CARICO	APLICACION	TEMPERATURA	DEFINICION	MATERIAL	ESPEC	UNID
1	1	U	5000	5000	200	PLACAS	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
2	2	U	5000	5000	200	PLACAS	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
3	1	U	4150	4150	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
4	1	U	10	10	200	PLACAS	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
5	1	U	400	400	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
6	1	U	500	500	200	PLACAS	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
7	1	U	500	500	200	PLACAS	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
8	1	U	1150	1150	200	PERFIL RECTANGULAR 40x20x3000	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
9	1	U	1150	1150	200	PERFIL RECTANGULAR 40x20x3000	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
10	2	U	1150	1150	200	PERFIL RECTANGULAR 40x20x3000	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
11	1	U	400	400	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
12	1	U	400	400	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
13	1	U	400	400	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
14	1	U	400	400	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
15	1	U	100	100	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
16	2	U	100	100	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
17	2	U	100	100	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	
18	8	U	100	100	200	VELOCIDAD 3000 RPM	A 304 SS	ESTRUCUTURAL	

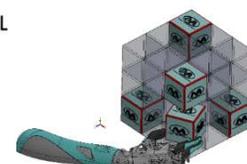


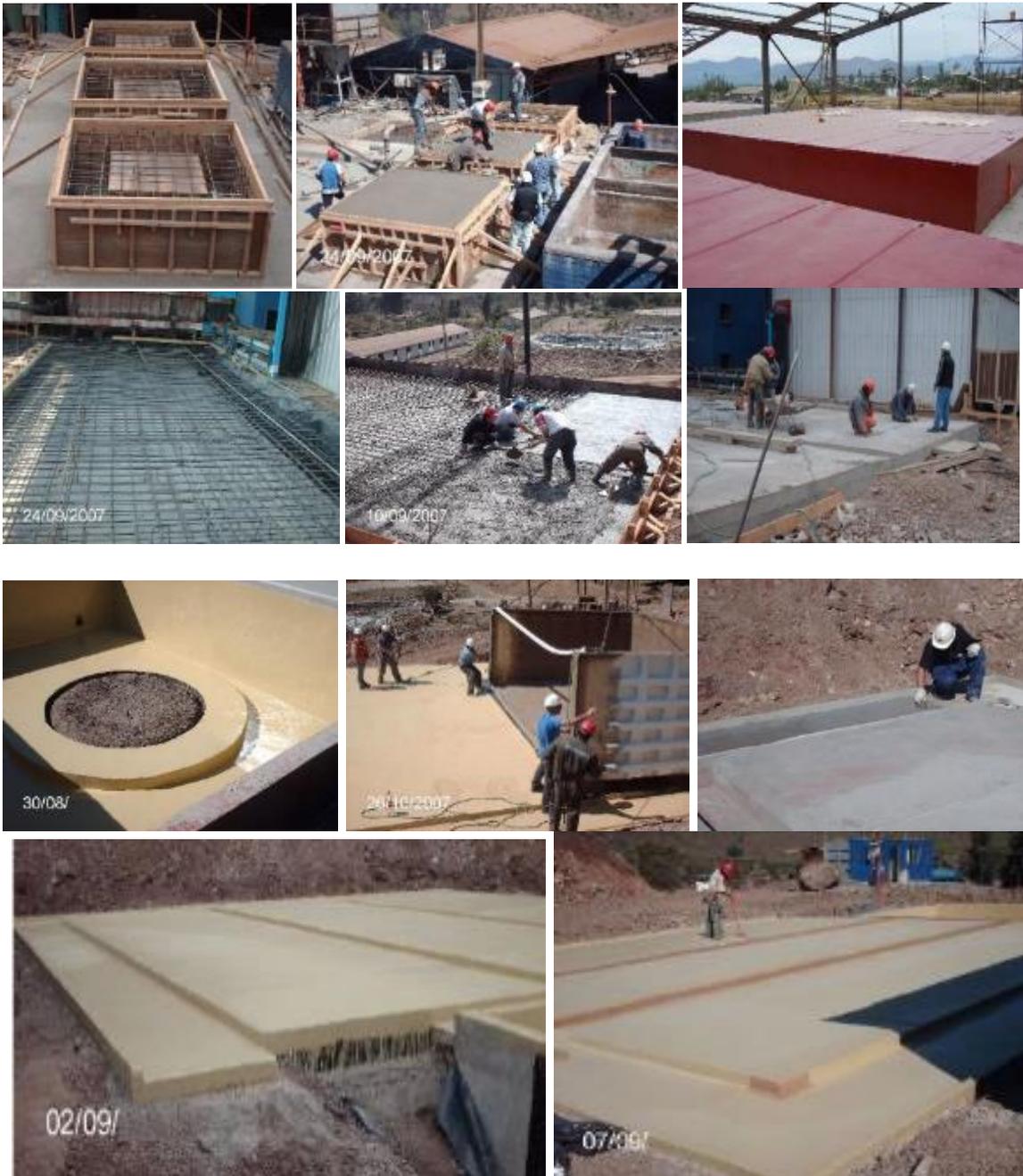
**7.3 OBRAS CIVILES (OO.CC)**



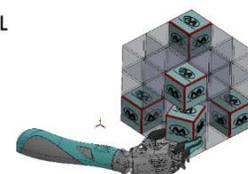
INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

[www.maha.cl](http://www.maha.cl)  
maha@maha.cl / +569-78785939



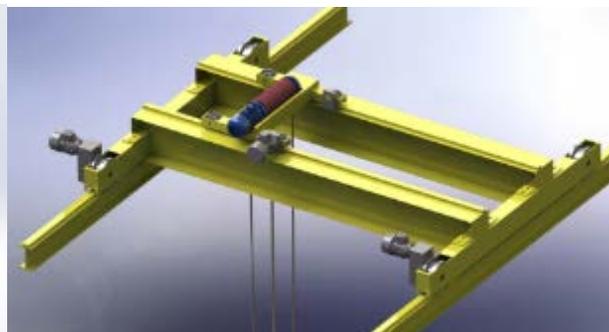
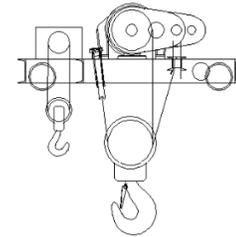
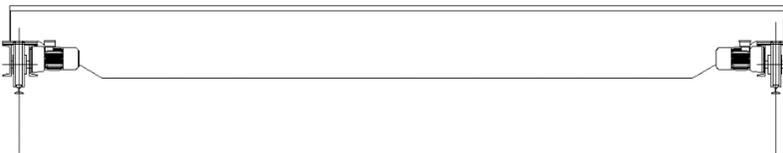
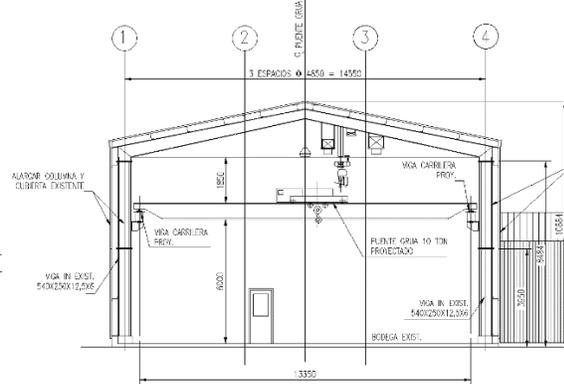
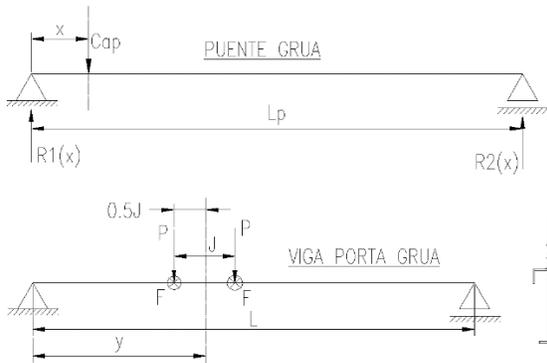
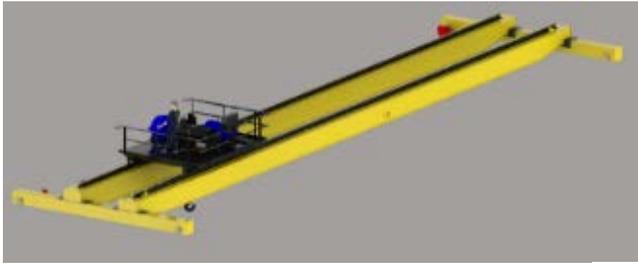


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL



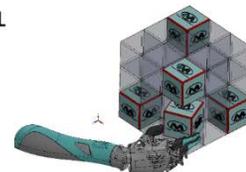


## 7.4 PUENTES GRUA



INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

[www.maha.cl](http://www.maha.cl)  
✉ [maha@maha.cl](mailto:maha@maha.cl) / 📞 +569-78785939



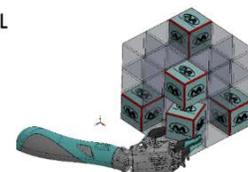


## 7.5 PLATAFORMAS INDUSTRIALES - GRATING Y BARANDAS

- Plataformas industriales y grating. Estructuras complementarias o de apoyo a existentes.

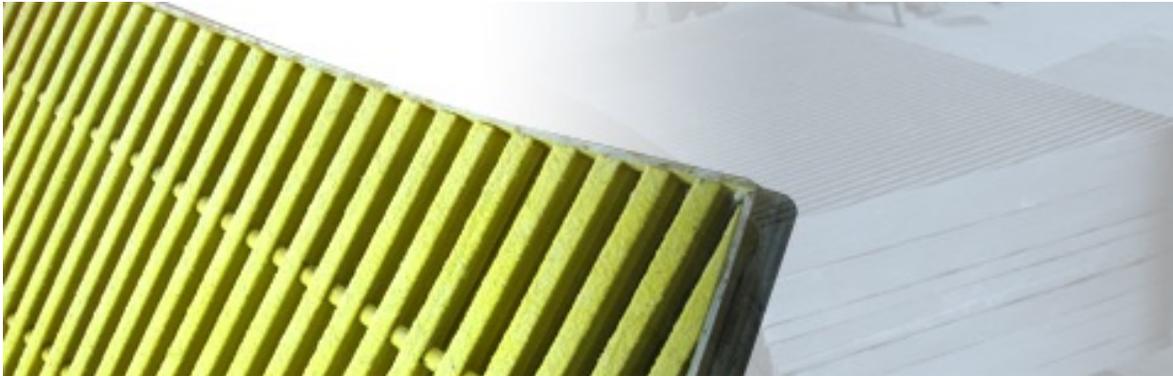


INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

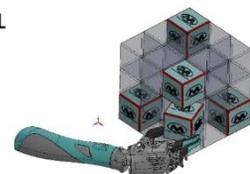




- Barandas y pasillos de tránsito.
- Soporte Piping.
- Fabricación y montaje de plataformas, grating, Barandas en acero y FRP, construidos con resina Vinilester de alta performance, resistente a ambientes altamente corrosivos por ataque gaseoso o por condensación, producto de salpicaduras o derrames. Las parrillas se fabrican con su superficie de tránsito en una terminación antideslizante con características anticorrosivas y de color amarillo.

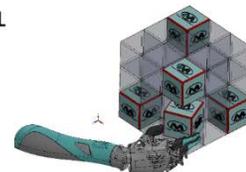


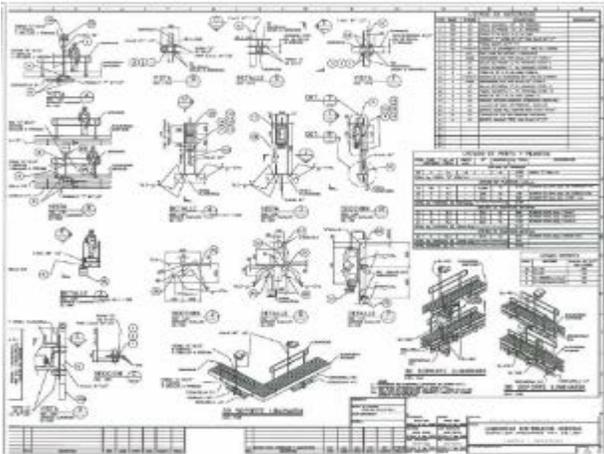
SERIE	Altura		Distancia Entre Barras Soportantes		PESO		Area Abierta
	mm	In	Mm	In	Kg/m2	Lb/ft2	%
T-2525	25	1,26	25	1,26	15	3,07	40
T-3238	32	1,26	38	1,50	15	3,07	40
T-3838	38	1,50	38	1,50	14	2,87	40





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL





INGENIERÍA-CONSTRUCCIÓN-MONTAJE INDUSTRIAL

